

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E**  
**GEODINÂMICA– PPGIG**

**FRANCISCO CRISTIANO ORLANDO**

**ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DO USO DE MDE GLOBAL EM TRABALHO DE**  
**GRANDE ESCALA AO LONGO DE TODO O TERRITÓRIO BRASILEIRO**

**BRASÍLIA**  
**2019**

**FRANCISCO CRISTIANO ORLANDO**

**ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DO USO DE MDE GLOBAL EM TRABALHO DE  
GRANDE ESCALA AO LONGO DE TODO O TERRITÓRIO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do Título de Mestre em Cartografia  
pelo Programa de Pós-Graduação em Geociências  
Aplicadas e Geodinâmica – PPGIG da  
Universidade de Brasília – UnB

Orientador: Professor Dr. Edilson de Souza Bias

**BRASÍLIA**

**2019**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FRANCISCO CRISTIANO ORLANDO**

**ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DO USO DE MDE GLOBAL EM TRABALHO DE  
GRANDE ESCALA AO LONGO DE TODO O TERRITÓRIO BRASILEIRO**

Dissertação de Mestrado submetida à Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Cartografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica.

Aprovador por:

---

Prof. Dr. Edilson de Souza Bias  
Universidade de Brasília – UnB

---

Prof. Dra. Rejane Ennes Cicerelli  
Universidade de Brasília – UnB

---

Dr. Marcus Fabiano Silva Saldanha  
DSG - Diretoria de Serviço Geográfico

Brasília-DF,

Dedico esta dissertação à minha família, amigos e colegas que me incentivaram e me ajudaram nos momentos oportunos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me confiado esta missão, e que nunca me deixou sozinho para desenvolver esta pesquisa, principalmente nos momentos de fraqueza.

Agradeço também à Onilda Maria, por ter me apoiado, pois sabia da importância que esta pesquisa tinha pra mim.

Agradeço à Anny Majory, por ter me repassado sua experiência com as palavras e formas de expressá-las.

Agradeço ao Edilson de Souza Bias, por ter acreditado na importância desta pesquisa e ter aceitado me orientar de forma que fosse possível.

Agradeço ao Marcelo Maranhão, por ter compartilhado dados e ideias para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço ao Marcelo Nunes, por ter compartilhado seus conhecimentos e dedicado algumas horas para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço ao IBGE, em especial ao Silvio Rogério, por ter possibilitado o desenvolvimento desta pesquisa acadêmica.

*“Não se gerencia o que não se mede,  
Não se mede o que não se define,  
Não se define o que não se entende,  
Não há sucesso no que não se gerencia”*

**Willian Edwards Deming**

## RESUMO

Atualmente, no Brasil e em diversas partes do mundo, muito se tem discutido em termos de uso dos dados MDE SRTM gerados pela NASA e que permitem a obtenção de Modelos Digitais de Elevação, sem no entanto, o conhecimento da sua real escala para aplicação em diversos campos de trabalhos cartográficos. Especialmente, no Brasil, onde encontramos um grande defasagem de produtos cartográficos nas escalas de 1:100.000, 1:50.000 e 1:25.000, tornando-se imprescindível o conhecimento das reais possibilidades dos dados do MDE SRTM, em razão de aplicações para geração cartográfica com o uso de imagens de alta resolução, pela necessidade da geração de ortorretificação. Desta forma, o objetivo deste trabalho é analisar as potencialidades do uso do MDE SRTM e definir a partir da análise em diversas situações de declividades, identificar as possíveis escalas para aplicações. Para tanto, foi selecionado todo o território nacional e compartimentado por meio da declividade e testado diversos métodos de interpolação com o uso de dados IceSat, e PPP. Paralelamente, testou-se os resultados desta aplicação para ortorretificação com imagem de satélite PRISM e também uma análise da acurácia planimétrica do MDE SRTM com referência o uso de um mapeamento na escala de 1/25.000. Os resultados demonstraram que o uso do MDE SRTM é compatível em mais de 90% do território nacional para a escala de 1:50.000 no PEC A analógico.

**Palavras-chave:** MDE SRTM. Acurácia. Declividade. Ortorretificação

## ABSTRACT

Currently, in Brazil and in various parts of the world, much has been discussed in terms of the use of NASA-generated SRTM DEM data, which allows obtaining Digital Elevation Models, but without knowledge of its real scale for application in various fields of cartographic work. Especially in Brazil, where we find a large gap of cartographic products in the scales of 1: 100,000, 1: 50,000 and 1: 25,000, making it necessary to know the real possibilities of DEM SRTM data, due to applications for cartographic generation. with the use of high resolution images, due to the need for orthorectification generation. Thus, the goal of this work is to analyze the potentialities of the use of DEM SRTM and to define from the analysis in several situations of slopes, to identify the possible scales for applications. To this end, the entire national territory was selected and compartmentalized by slope and several interpolation methods were tested using IceSat and PPP data. At the same time, we tested the results of this application for PRISM satellite image orthorectification and also an analysis of the DEM SRTM planimetric accuracy with reference to the use of a 1 / 25,000 scale mapping. The results showed that the use of DEM SRTM is compatible in more than 90% of the national territory for the 1: 50,000 scale in the analog PEC A.

**Keywords:** DEM SRTM. Accuracy. Declivity. Orthorectification

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Penetração das ondas no dossel da vegetação.....	22
Figura 2 – Uma mesma superfície representada em dois sistemas de referência e/ou projeções diferentes .....	38
Figura 3 – Fluxograma das atividades .....	41
Figura 4 – Mapa de declividade do Brasil .....	43
Figuras 5a, b, c, d, e – Delimitação das áreas com diferentes classes de declividade .....	44
Figura 6 – Distribuição dos pontos de controle PPP em função das classes de declividade ...	46
Figura 7 – Área de avaliação planimétrica do MDE SRTM .....	51
Figura 8 – Pontos fotoidentificáveis homólogos .....	52
Figura 9 – Área selecionada para avaliação da exatidão dos dados IceSat .....	54
Figura 10 – Distribuição dos pontos altimétricos utilizados do satélite IceSat .....	55
Figura 11 – Distribuição dos pontos de campo utilizados (PPP) .....	57
Figura 12 – Localização do município de Itaguaí no Estado do Rio de Janeiro .....	58
Figura 13 – Imagem PRISM de parte do município de Itaguaí .....	59
Figuras 13a, b, c, d, – Distribuição dos pontos de controle utilizados na geração das ortoimagens .....	60
Figura 14 – Pontos de controle utilizados na avaliação das ortoimagens em Itaguaí .....	61
Figura 15 – Variação do valor do ZE90 em metros, quanto ao MDE analisado em suas diversas configurações de declividade .....	63
Figura 16 – Variação do valor do EQM em metros, quanto ao MDE analisado em suas diversas configurações de declividade .....	64
Figuras 17a, b, c, d, e, f – Box plot em diferentes classes de declividade .....	66
Figura 18 – Comportamento do EQM, nas superfícies equipotenciais do EGM 96 e no MapGeo 2015, em diversos tipos de declividade .....	68
Figura 19 – Comportamento do ZE90, nas superfícies equipotenciais do EGM 96 e no MapGeo 2015, em diversos tipos de declividade .....	69
Figura 20 – Mapa da qualidade do MDE SRTM, baseado apenas na declividade do relevo .	70
Figura 21 – Discrepâncias do MDE gerado por krigagem para o MDE SRTM original .....	74
Figura 22 – Discrepâncias do MDE gerado por “Topo to raster” para o MDE SRTM original .....	74

Figura 23 – Delta N e Delta E do MDE SRTM .....	75
Figura 24 – Box plot das discrepâncias planimétricas do MDE SRTM .....	76
Figura 25 – Box plot dos dados IceSat .....	78
Figura 26 – Mapa de discrepâncias do MDE SRTM .....	80
Figura 27 – Mapa da qualidade do MDE SRTM por folha de 1/250.000 .....	81
Figura 28 – Amostras que contemplam as maiores divergências entre os PECs do MDE SRTM tendo pontos IceSat e pontos PPP como referência .....	83
Figura 29 – Mapa da potencialidade da utilização do MDE SRTM no processo de ortorretificação .....	86

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – PEC altimétrico Analógico .....	30
Quadro 2 – PEC altimétrico digital .....	30
Quadro 3 – Tipos de amostragem .....	36
Quadro 4 – Padrão do Nível de Qualidade Aceitável .....	36
Quadro 5 – Elementos de qualidade de dados espaciais .....	37
Quadro 6 – Comparação do EQM e ZE90 nos diversos tipos de declividade, utilizando os MDEs 30 e 90 do SRTM e o MDE ALOS/PALSAR .....	63
Quadro 7 – Classificação do PEC do MDE SRTM em diversas classes de declividade .....	65
Quadro 8 – Discrepâncias máximas e mínimas entre a superfície equipotencial EGM96 comparado com a superfície equipotencial oficial do Brasil, o MAPGeo 2015 .....	67
Quadro 9 – Valores do EQM nas superfícies equipotenciais do EGM 96 e no MAPGeo 2015, em diversos tipos de declividade .....	68
Quadro 10 – Valores em metros do ZE 90 nas superfícies equipotenciais do EGM 96 e no MAPGeo 2015, em diversos tipos de declividade .....	69
Quadro 11 – Porcentagem da presença das classes de declividade por região .....	71
Quadro 12 – Qualidade do MDE SRTM separada por região .....	71
Quadro 13 – Quadro de comparação das avaliações do refinamento do MDE SRTM por diversos métodos de interpolação .....	72
Quadro 14 – Avaliação planimétrica do MDE SRTM .....	75
Quadro 15 – T´Student do MDE SRTM .....	77
Quadro 16 – Teste do Qui-Quadrado do MDE SRTM .....	77
Quadro 17 – Avaliação dos dados altimétricos oriundos do satélite IceSat .....	78
Quadro 18 – Comparativo do PEC das ortofotos geradas com diversos MDEs e número de pontos de controle .....	84

## LISTA DE SIGLAS

MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
ALOS PALSAR	<i>Advanced Land Observing Satellite Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar</i>
GDEM	<i>Global Digital Elevation Model</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NIMA	<i>National Imagery and Mapping Agency</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
DSG	Diretoria do Serviço Geográfico
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ICESat	Ice Cloud and Land Elevation Satellite
PPP	Posicionamento de Ponto Preciso
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
CONCAR	Comissão Nacional de Cartografia
NMAS	<i>Nacional Map Accuracy Standard</i>
ASPRS	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
NSSDA	<i>National Standard for Spatial Data Accuracy</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfico
ET-ADGV	Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais
EQM	Erro Quadrático Médio
NQA	Nível de Qualidade Aceitável
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
LP DAAC	<i>Land Processes Distributed Active Archive Center</i>
ICM	<i>Interated Conditional Modes</i>
NTT Data	<i>Nippon Telegraph and Telephone</i>
RESTEC	Centro de Tecnologia de Sensoriamento Remoto do Japão

GLAS	<i>Geoscience Laser Altimeter System</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
IDW	Inverso da Potência das Distâncias
ZE 90	Linear Error 90%
EGM96	Earth Gravitational Model 1996
WGS-84	World Geodetic System 1984
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
GRS-80	Geodetic Reference System 1980
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
ENVI	<i>Environment for Visualizing Images</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
CE 90	Circle Error 90%
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
RADAR	<i>Radio Detection And Ranging</i>
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
ANUDEM	<i>Australian National University DEM</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>HIPÓTESE</b> .....	<b>19</b>
<b>1.2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>19</b>
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>19</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE)</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>PROCESSO DE INTERPOLAÇÃO</b> .....	<b>23</b>
<b>2.3</b>	<b>IMPORTÂNCIA DO MDE NA ORTORRETIFICAÇÃO</b> .....	<b>25</b>
<b>2.4</b>	<b>CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS GEOESPACIAIS</b> .....	<b>26</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Dados de referência (Verdade de Campo)</b> .....	<b>26</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Parâmetros para avaliação de qualidade</b> .....	<b>28</b>
	<b>a) Normas</b> .....	<b>28</b>
	<b>b) Estatísticas planimétricas</b> .....	<b>31</b>
	<b>c) Estatísticas altimétricas</b> .....	<b>34</b>
	<b>d) Tratamento dos outliers</b> .....	<b>34</b>
	<b>e) Técnicas de amostragem</b> .....	<b>35</b>
	<b>f) Elementos de qualidade</b> .....	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODO</b> .....	<b>40</b>
<b>3.1</b>	<b>MATERIAIS</b> .....	<b>40</b>
<b>3.2</b>	<b>MÉTODO</b> .....	<b>41</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Seleção de áreas piloto (compartimentadas por classes de declividade)</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Normalização dos dados e identificação dos dados espúrios (outliers)</b> .....	<b>45</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Análise do PEC dos MDEs globais e geração do mapa de qualidade do MDE SRTM baseado na declividade</b> .....	<b>48</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Refinamento do MDE SRTM</b> .....	<b>49</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Avaliação da acurácia posicional do MDE SRTM</b> .....	<b>50</b>

3.2.6	Avaliação da qualidade dos dados do satélite IceSat .....	53
3.2.7	Avaliação da acurácia altimétrica do MDE SRTM tendo os pontos IceSat como referência (MDS) .....	55
3.2.8	Definição e seleção de amostras para avaliação da qualidade do MDE SRTM tendo como referência os pontos PPP (MDT) e IceSat (MDS) .....	56
3.2.9	Avaliação da acurácia altimétrica do MDE SRTM tendo os pontos PPP como referência (MDT) .....	58
3.2.10	Identificação e seleção de áreas e dos dados necessários para avaliação no processo de ortorretificação .....	58
3.2.11	Aplicação dos processos de ortorretificação para geração de diversas qualidades de ortoimagens .....	60
3.2.12	Análise da potencialidade de uso do MDE SRTM no processo de ortorretificação .....	61
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>63</b>
4.1	ANÁLISE DO PEC DOS MDEs GLOBAIS POR CLASSE DE DECLIVIDADE .....	63
4.1.1	Análise da conversão do EGM 96 para o MapGeo 2015 .....	67
4.2	MAPA DE QUALIDADE DO MDE SRTM PARA TODO O TERRITÓRIO BRASILEIRO COM BASE NA DECLIVIDADE .....	70
4.3	ANÁLISE DOS MDEs GERADOS COM A APLICAÇÃO DOS DIFERENTES MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO .....	72
4.4	AVALIAÇÃO PLANIMÉTRICA DO MDE SRTM .....	75
4.5	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS DADOS ALTIMÉTRICOS DO SATÉLITE ICESAT .....	78
4.6	AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA ALTIMÉTRICA DO MDE SRTM AO LONGO DO TERRITÓRIO BRASILEIRO TENDO OS PONTOS ALTIMÉTRICOS DO SATÉLITE ICESAT COMO REFERÊNCIA (MDS) .....	79
4.7	ANÁLISE COMPARATIVA POR AMOSTRAGEM ENTRE A QUALIDADE DO MDE SRTM AVALIADO COMO (MDS) E (MDT) .....	82
4.8	ANÁLISE DO USO DE DIVERSAS QUALIDADES DE MDEs NO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ORTOIMAGENS .....	84
4.9	ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DO USO DO MDE SRTM .....	86

<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>87</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>89</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>90</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A importância de um modelo digital de elevação (MDE) está relacionada à capacidade de utilização do mesmo em atividades como no processo de ortorretificação, geração de modelo hidrológico, análise de susceptibilidade, obras de engenharia como construção de barragens, entre outros.

O processo de ortorretificação tem por objetivo gerar uma imagem em que as distorções internas (do sistema) e externas (da paisagem) sejam corrigidas, tais distorções são provenientes da instabilidade da plataforma onde se encontram os sensores, isto é, no movimento de rotação e curvatura da Terra e nas características geométricas dos sensores.

Para a correção destas distorções é necessário realizar o processo de ortorretificação, para o qual se faz com o uso de um modelo digital de elevação (MDE) para favorecer a correção na imagem das influências topográficas do relevo, tornando as coordenadas mais precisas, e corrigindo os efeitos de perspectivas e a influência do relevo (vales e morros) sobre a geometria da imagem.

O processo de ortorretificação ocorre, tanto em fotografias aéreas como em imagens de satélite, principalmente as de alta resolução espacial por fornecerem as efemérides necessárias para as devidas correções.

Diversos produtos utilizaram o MDE SRTM (Modelo Digital de Elevação elaborado pela missão *Shuttle Radar Topography Mission*) como insumo no processo de ortorretificação, como é o caso das imagens RapidEye.

De acordo com Cruz et al. (2012), nos últimos tempos tem-se observado um significativo aumento de sensores de mapeamento com a finalidade de permitir a extração de informações tridimensionais e, assim como os sensores, a disponibilização de hardwares e softwares cada vez mais potentes facilita a geração de produtos cartográficos de melhor qualidade, principalmente para a concepção de Modelos Digitais de Elevação (MDE).

Ressalta-se que existem vários sensores orbitais gerando modelos digitais de elevação em todo o mundo. No entanto, o MDE SRTM é o modelo digital de elevação global mais popular, sendo sempre o primeiro a ser lembrado quando se trata do assunto, isto porque foi a primeira missão que fez o registro de altitude de grande parte do globo terrestre e também por ter sido o primeiro modelo disponibilizado gratuitamente, possuindo uma grande base de usuários e aplicações das mais diversas possíveis em todo o mundo.

O motivador da presente pesquisa, foi a escassez de trabalho que efetue a avaliação de modelos digitais de elevação globais para todo o território brasileiro. Muitos estudos

apresentam enfoques regionais e locais, não favorecendo uma visão geral das reais potencialidades dos produtos, e o desconhecimento da real precisão destes modelos faz com que os mesmos sejam utilizados de forma indevida ou até mesmo deixem de ser utilizados em situações nas quais atenderiam adequadamente aos objetivos com facilidade.

Diversas imagens de satélites, distribuídas de forma gratuita ou não, não são disponibilizadas ortorretificadas, portanto, faz-se necessário realizar as devidas correções pelo processo de ortorretificação, o que é realizado com a utilização de um Modelo Digital de Elevação (MDE) que corrige as distorções com o terreno, além das efemérides do satélite, que corrige a distorção gerada pela instabilidade da plataforma do sensor.

É notório que a tecnologia como um todo vem avançando a passos largos, tão rapidamente que dificulta seu acompanhamento, o que não é diferente com as geotecnologias, principalmente referente aos satélites, de tal forma que permitiu a produção cartográfica de modo mais rápido e com menor custo, na medida em que se reduz substancialmente as atividades de campo.

Recentemente foi lançado pela Digital Globe, o WorldView 3, que possui resolução espacial de 30 cm, considerada de altíssima resolução, possibilitando uma nova oportunidade para atualização cartográfica em grande escalas.

No Brasil, as instituições oficiais para a elaboração e distribuição de informações cartográficas são o IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, e DSG – Diretoria de Serviço Geográfico do Exército, no entanto, o IBGE disponibiliza apenas, menos de 2% (dois por cento) do território brasileiro, o mapeamento na escala de 1/25.000, comprometendo a qualidade dos trabalhos em grandes escalas.

A importância do mapeamento em grandes escalas, se dá pelo fato dos detalhes obtidos em mapeamentos cadastrais, requisitos demandados cada vez mais pela sociedade.

Alguns produtos orbitais já demonstraram, em estudos como o de Mitishita (2003), o de Araújo et al. (2007), o de Pinto & Amorim (2011), que possuem capacidade de atender com facilidade até a escala de 1/10.000, entretanto, o estudo de Barbosa & Bias (2019) obteve uma ortoimagem compatível com a escala de 1/5.000 ao ortorretificar uma imagem orbital Worldview 2 em uma área plana.

Por estas razões, faz necessário conhecer e analisar qual a potencialidade do MDE SRTM para geração de cartas topográficas planialtimétricas melhores que 1/25.000.

Assim, considerando o princípio da economicidade de recursos públicos, torna-se necessário um maior entendimento sobre a qualidade do MDE SRTM, pois é intensa a utilização dos MDEs elaborados a partir dele, por parte dos órgãos públicos como o IBGE, a

DSG, a ANA – Agência Nacional de Águas, a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, bem como por Universidades, pois este produto (MDE SRTM) abrange todo o território brasileiro, além de ser distribuído de forma gratuita.

## **1.1 HIPÓTESE**

Dado a importância e necessidade da geração de cartas em escala melhor que 1/25.000 no território brasileiro, o uso de um MDE proveniente do SRTM pode ser a solução mais viável, atendendo os padrões de qualidade preceituados pelas normas da CONCAR (Comissão Nacional de Cartografia).

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Analisar e apresentar, de forma regional para o território brasileiro, qual o melhor MDE possível de ser obtido a partir dos dados SRTM, com o intuito de atender as aplicações cartográficas.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Avaliar a qualidade do MDE SRTM em todo o território brasileiro, baseado na declividade, tendo como referência dados PPP (Posicionamento por Ponto Preciso);

Identificar o limite do uso do MDE SRTM no processo de ortorretificação, ao longo de todo o território brasileiro;

Analisar a qualidade do MDE SRTM após o refinamento do mesmo com a aplicação de métodos de interpolação, em função da variação da declividade.

Avaliar o MDE SRTM em todo o território brasileiro, tendo como referência dados altimétricos oriundos de laser por satélite (IceSat - Ice Cloud and Land Elevation Satellite).

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE)

A National Imagery and Mapping Agency (NIMA) e a National Aeronautics and Space Administration (NASA) foram as instituições responsáveis pela missão SRTM, os dados de RADAR (*Radio Detection And Ranging*) foram coletados no período de 11 a 22 de fevereiro de 2000 (durante 11 dias), a bordo da nave espacial Endeavour, nesse período, a nave realizou 16 órbitas diárias na Terra, o que correspondeu a 176 órbitas durante toda a missão. GOMES (2011).

De acordo com Valeriano; Rosseti (2011), o MDE SRTM foi obtido no ano de 2000 pelo sensor SIR-C/X-SAR., por meio da interferometria SAR, em bandas com pequenos comprimento de ondas (bandas X e C), gerando um modelo digital de elevação com resolução de 30 metros, porém, a NASA só disponibilizava esta resolução para os Estados Unidos e o referido modelo depreciado para 3 segundos de arco, aproximadamente 90 metros, para outras localidades. A área de cobertura do MDE SRTM compreende às latitudes de 60° N até 56° S. Desde novembro de 2013, o MDE SRTM está sendo disponibilizado pela NASA com resolução espacial de 30 metros para todas as localidades.

Os estudos de Rodriguez et al. (2005), indicam que o erro do MDE SRTM está superior ao estimado pela NASA para a América do Sul e sinalizam que os menores erros do MDE SRTM, estão localizados em áreas planas, e os maiores em áreas de relevo fortemente ondulado.

O projeto TOPODATA (Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil) elaborado por Valeriano; Rosseti (2011), disponibilizou dados do MDE SRTM interpolados pelo método da krigagem para todo o território brasileiro, com resolução espacial de 30 m, a partir do MDE SRTM disponibilizado pela NASA com resolução espacial de 90 metros. Este produto foi utilizado por muitas instituições até a disponibilização do MDE SRTM original com resolução espacial de 30 m para todas as localidades.

Gaboardi et al. (2005), concluíram que o MDE SRTM atende a escala de 1/100.000 em áreas planas, pois o referido trabalho se concentrou apenas na região amazônica. Outros estudos, como realizado por Orlandi (2016), demonstraram resultados semelhantes para a avaliação do MDE SRTM em outras áreas no território brasileiro, com diferenças de declividade.

De acordo com Rabus et al. (2003), a precisão estimada a priori pela NASA para o MDE SRTM é de 16 m em 90% dos dados, sendo compatível com a escala de 1/100.000. Estudos de Elkhachy et al. (2017) encontraram acurácia vertical do MDE SRTM próximo de 6 m na cidade de Najran, na Arábia Saudita, indicam que a qualidade do MDE SRTM está bem superior ao estimado pela NASA.

Assim como o MDE SRTM, outros produtos desta natureza foram sendo disponibilizados ao longo dos anos e trazendo consigo uma melhoria significativa nas resoluções espaciais, como exemplo disso, são os dados GDEM (*Global Digital Elevation Model*) com resolução de 30 metros, ALOS/PALSAR (*Advanced Land Observing Satellite/Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*) com resolução de 12,5 metros.

O satélite Terra (1999) possui diversos sensores, como por exemplo o ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), que oferece a possibilidade de se gerar modelo digital de elevação por meio de pares estereoscópicos adquiridos na mesma órbita com dois sensores ASTER idênticos, um deles na posição Nadir e o outro Off-Nadir. A primeira versão do GDEM, foi lançada em junho de 2009, com resolução de 30 metros, cuja cobertura compreende 83°N a 83°S, cobrindo 99% da crosta terrestre.

Em 17 de outubro de 2011, o Ministério da Economia, Comércio e Indústria (METI) do Japão e a Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos (NASA), anunciaram o lançamento do GDEM Versão 2, onde foram incluídos 260.000 pares estéreo e reduzido a ocorrência de ruídos. USGS (United States Geological Survey) apresentaram a acurácia altimétrica estimada do ASTER GDEM v2 em 20 m para 95% dos pontos coletados na amostra e a acurácia horizontal declarada deste produto é de 30 m (1 pixel) também para 95% da amostra (ASTER GDEM, 2011).

Satge et al. (2016) ao avaliar diversos MDEs no planalto Andino da América do Sul em diferentes classes de declividade, assim como o potencial destes para aplicações hidrológicas na região, concluíram que o MDE SRTM é mais preciso que o GDEM v2, este resultado corrobora com os resultados encontrados por Nakahori (2010), Moura et al. (2014), Celestino & Philips (2015).

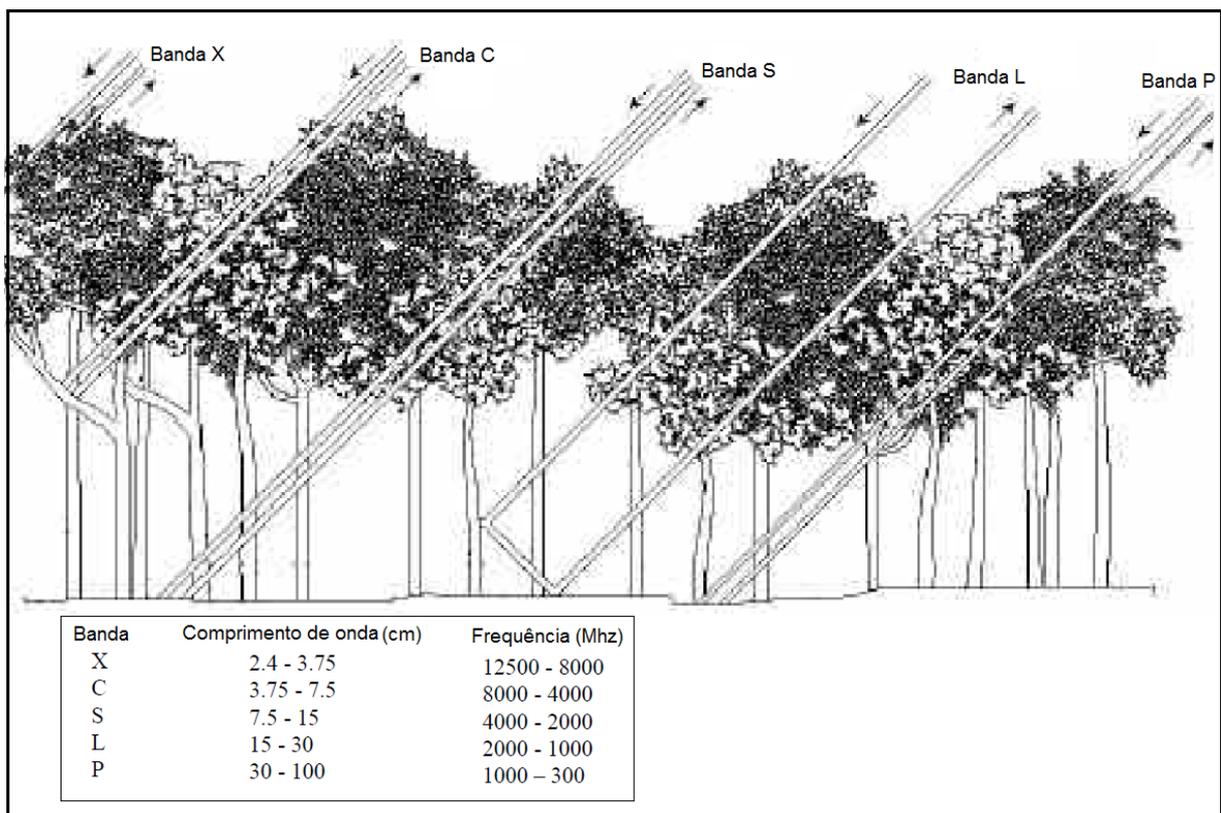
O modelo digital de elevação do ALOS, foi lançado em janeiro de 2005 pela Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), obtido na banda L e disponibilizado pela NASA no geoportall da LP DAAC – Land Processes Distributed Active Archive Center, com uma resolução espacial de 12,5 metros.

Originalmente os dados do sensor ALOS/PALSAR foram obtidos com uma resolução espacial de 10 metros, no entanto, os dados sofreram um *down sampling*, ou seja, foram

degradados para uma resolução de 30 metros, a fim de corrigir geometricamente os dados, sendo em seguida reamostrados (*up sampling*) para a resolução 12,5 metros. O MDE ALOS/PALSAR foi processado através do programa ASF MapReady 3.1 realizando a correção geométrica e a correção radiométrica para o ângulo de incidência local com base no MDE com resolução espacial de 12,5 metros, que foram reamostradas, por meio de uma interpolação pelo método do vizinho mais próximo. BERNINI (2016).

Segundo Dobson (2000) Pequenos comprimentos de onda, bandas X e C, obtém informações altimétricas sobre a superfície do dossel vegetal (MDS – Modelo Digital de Superfície), através do retroespalhamento das folhas, para os comprimentos de onda maiores, bandas L e P, estas tem uma penetração maior no dossel da vegetação e que dependendo da densidade da vegetação, assim como o laser, as bandas L e P podem obter informações no solo (MDT – Modelo Digital de Terreno), conforme ilustra a figura 1.

Figura 1 – Penetração das ondas no dossel da vegetação



Fonte: Leckie e Ranson (1998)

O desenvolvimento do AW3D começou em fevereiro de 2014 e é resultado de um projeto de parceria público-privada entre a JAXA, a NTT Data (*Nippon Telegraph and Telephone*) e o Centro de Tecnologia de Sensoriamento Remoto do Japão (RESTEC),

contando com mais de 3 milhões de imagens de satélite de alta resolução superpostas. O AW3D Standard foi gerado a partir dos dados PRISM adquiridos pelo Satélite Avançado de Observação da Terra (ALOS) da Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA), cuja precisão estimada é de 5 metros na acurácia planimétrica e de 5 metros na acurácia altimétrica, e o AW3D enhanced possui resolução espacial que varia de 0,5 a 2 metros.

De acordo com Höhle; Höhle (2009), atualmente na produção cartográfica em escalas médias e grandes de mapeamento, são produzidos MDE/MDS (Modelo Digital de Superfície), principalmente, por Fotogrametria Digital e LIDAR (*Light Detection And Ranging*), os dois métodos são eficientes e acurados, obtendo uma alta densidade de pontos planialtimétricos.

O LIDAR é um sensor remoto ativo a bordo de plataformas (tripuladas ou não) e um método direto de captura de dados, o mesmo possui sua própria fonte de energia, neste caso, uma fonte de luz, o laser. O LIDAR emite feixes de luz na banda do infravermelho próximo e é capaz de modelar a superfície do terreno. INPE (2018).

No estudo de Moura et al. (2014), quando avaliaram a acurácia dos MDE's globais SRTM v4, Topodata, HydroSHEDS e o ASTER v2, utilizando o mapeamento na escala de 1/10.000 como referência, concluíram que o TOPODATA teve a melhor acurácia, com um desvio padrão de 4,91 metros, e a pior acurácia foi o HydroSHEDS, e que todos os MDE's avaliados são compatíveis com a escala de 1/50.000 em relevo pouco movimentado e 1/100.000 para maiores declividades.

## **2.2 PROCESSO DE INTERPOLAÇÃO**

A definição mais simples de interpolação, é o processo de determinar valores desconhecidos usando valores conhecidos ou amostrados, assumindo que o valor que está sendo determinado é aproximado, em função do modelo matemático usado, de acordo com Miranda (2010), os valores desconhecidos são calculados de acordo com esta função. Os melhores resultados são obtidos quando a função matemática se comporta de maneira similar ao fenômeno.

De acordo com Burrough; Mcdoneel (1998), os interpoladores são divididos em duas categorias: os determinísticos e os estocásticos. Os determinísticos geram superfícies considerando apenas as funções matemáticas e não se preocupam com a variabilidade espacial, e segundo Mazzini; Schettini (2009), os interpoladores estocásticos fazem uso da teoria da probabilidade, e incorporam critérios estatísticos na determinação do peso atribuído aos pontos amostrais para o cálculo das interpolações.

Quando existem dados conhecidos em abundância, a maioria dos métodos de interpolação produz valores semelhantes e no caso de poucos dados, alguns métodos, principalmente os determinísticos, possuem limitações na representação da variabilidade espacial, porque desconsideram a anisotropia e a continuidade do fenômeno que se quer observar. Burrough; Mcdoneel (1998).

Os métodos de interpolação mais conhecidos, analisados e estudados são: TIN (*Triangular Irregular Network*), IDW (Inverso da Potência das Distâncias), Topo to Raster, krigagem, e Vizinho mais próximo.

De acordo com Mazzini; Schettini (2009), o método de interpolação da triangulação de Delaunay, se baseia na técnica da rede de triangulação irregular (TIN), este utiliza malha irregular a partir de triângulos e tem um melhor resultado quando os dados a serem interpolados estão distribuídos de forma homogênea.

O método do inverso da distância (IDW), no qual calcula-se um determinado peso em função da distância, fazendo com que os pontos mais distantes interfiram menos no processo de interpolação, porém, esse processo é determinístico, ou seja, não considera a variação do relevo. Mazzini; Schettini (2009).

Estudos de Hutchinson et al. (2009), mencionam a existência de vários interpoladores para diversas finalidades, um deles é o método *Topo to Raster*, onde a interpolação dos dados é feita utilizando a soma ponderada dos quadrados dos resíduos a partir dos dados de elevação da superfície representada pela grade amostral. No estudo de Celestino (2014), após várias pesquisas acerca de interpoladores, chegou-se a conclusão que, para refinar modelos digitais de elevação, o método *Topo to Raster* era suficiente, obtendo assim, o mesmo resultado do estudo de Hutchinson et al. (2009), quando concluíram que o método ANUDEM (*Australian National University DEM*), no qual o *Topo to Raster* é baseado, é indicado para gerar modelos de elevação acurados.

O método da krigagem não é um método simples de interpolação, pois utiliza geoestatística para efetuar a interpolação, o que em muitos casos, é uma grande vantagem sobre outros métodos, pois esta técnica, por ser estocástica, considera a variação do relevo em função da distância, sendo assim, a krigagem requer, além dos dados de entrada, informações geoestatísticas (coeficientes), que controlam a distribuição dos pesos para o cálculo dos valores interpolados. A krigagem defini o grau de dependência ou correlação espacial entre as amostras por semivariograma, e é a partir desta definição, que se defini os melhores pesos para as amostras CRESSIE (1991).

De acordo com Hutchinson (2009), o método “Topo to Raster” utiliza a soma ponderada dos quadrados dos resíduos das amostras e o método da krigagem dá pesos a diferentes amostras, sendo determinados por uma análise espacial baseado no semivariograma.

Conforme o estudo de Silva (2016), o método de interpolação adequado encontrado para avaliar a qualidade do mapeamento do projeto BC250 (Base cartográfica contínua em todo o território brasileiro na escala de 1/250.000 publicado pelo IBGE), foi o método estocástico (krigagem), pois obteve o melhor resultado nas estimativas de valores ao apresentarem menores valores de resíduos, RMSE (*Root Mean Square Error*), entre todos demais avaliados no referido estudo.

Os estudos de Miranda et al. (2018) sinalizaram que para uma grande quantidade de amostras, acima de 500 pontos, os interpoladores IDW, TIN e Vizinho mais próximo possuíram resultados idênticos, e com poucos pontos apenas o TIN e o vizinho mais próximo obtiveram resultados idênticos, afirmando ainda que quanto maior o número de pontos pior o resultado por meio da aplicação do interpolador Spline.

### **2.3 IMPORTÂNCIA DO MDE NA ORTORRETIFICAÇÃO**

De acordo com Toutin (2004), ortorretificação é o processo de remover os erros geométricos inerentes das fotografias e imagens, esses erros são oriundos da orientação e erros sistemáticos associados à câmera e ao sensor, deslocamento devido ao relevo e curvatura da terra, onde a importância do MDE no processo de ortorretificação está ligado diretamente a função de eliminar os efeitos do deslocamento devido ao relevo.

Conforme Toutin (2004), a ortorretificação tem a função de corrigir as distorções causadas pelo terreno, pelos ângulos de atitude da plataforma e pela variação da posição do satélite, ou seja, tornar todos os dados presentes na imagem numa projeção ortogonal como se a imagem fosse obtida com o sensor sobre cada informação da imagem. Diversos modelos matemáticos de ortorretificação têm sido desenvolvidos, e que pode-se dividi-los em duas classes: Os modelos rigorosos ou físicos, baseados no princípio da colinearidade, e modelos aproximados, baseado na utilização de polinômios.

Toutin (2004), afirma que um dos erros que está presente nas imagens obtidas por sensores remotos é a distorção geométrica, desta forma, antes de sua utilização, é necessário um pré-processamento denominado correção geométrica, que se faz por meio do uso das efemérides do satélite no instante da tomada da imagem. Estas correções são efetuadas a partir

de uma modelagem matemática que relaciona as coordenadas do espaço-imagem com as coordenadas do espaço-objeto.

Ainda de acordo com Toutin (2004), os parâmetros físicos são: localização do ponto principal, tamanho do pixel, distorções das lentes e os parâmetros de orientação que são: posição e altitude do sensor no instante da aquisição da imagem, esses parâmetros são informados pelas efemérides do satélite.

De acordo com o estudo de Nakahori (2010), a acurácia planimétrica obtida no processo de ortorretificação é menor quando se utiliza o MDE SRTM, quando comparado com o ASTER GDEM, pois a ortofoto gerada com o MDE SRTM apresentou um erro médio de 3,66 metros e desvio padrão de 1,34 metro, enquanto que a ortofoto gerada com o MDE ASTER GDEM apresentou erro médio de 4,61 metros e desvio padrão de 1,80 metro. A ortofoto gerada com o MDE do PRISM apresentou um erro médio de 3,22 metros e desvio padrão de 1,05 metro, resultado muito semelhante aos encontrados nas ortofotos geradas com o uso do MDE SRTM e MDE ASTER GDEM, onde todos são compatíveis com o PEC (Padrão de Exatidão Cartográfico) na escala de 1/25.000 classe A.

O estudo de Maranhão et al. (2011), na avaliação da qualidade da ortofoto gerada a partir de imagens de alta e média resolução, utilizando MDEs obtidos de carta topográfica local na escala de 1/10.000, GDEM de 30 metros e MDE SRTM de 90 metros de resolução espacial, com onze pontos de controle para a referida geração, no município de Seropédica, apresentou resultados semelhantes, concluindo que as maiores diferenças se concentraram na área com relevo mais movimentado.

## **2.4 CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS GEOESPACIAIS**

### **2.4.1 Dados de referência (Verdade de campo)**

Um ponto de controle possui a característica de ser acurado o suficiente para avaliar um produto cartográfico qualquer, e que segundo Merchant (1982) essa acurácia deve ser 3 vezes superior ao produto a ser avaliado.

Segundo Zwally et al. (2002), o IceSat é o satélite da NASA, destinado a medir a massa de gelo, bem como características da topografia e da vegetação terrestre, e foi lançada em 12 de janeiro de 2003.

De acordo com Schutz et al. (2005), o IceSat utilizou uma altimetria de laser de feixe estreito para determinar as coordenadas geodésicas de uma série de pontos nas calotas polares

com precisão vertical da ordem de decímetros. O único instrumento do satélite foi o GLAS (Geoscience Laser Altimeter System), o primeiro a realizar altimetria a Laser, que emite pulso eletromagnético pelo satélite, capturando dados de elevação junto com seu registro digital. A altitude é determinada com base nessa resposta e no tempo de transmissão e recebimento do eco.

Segundo O'Loughlin et al. (2016), apesar dos dados do IceSat serem uma fonte de informação de altimetria bastante precisa, estes dados não são muito explorados pela comunidade científica, isto pode ser devido, em parte, pelo fato de que os pesquisadores que pretendam estes dados precisam baixar e processar seu próprio conjunto de dados, e desenvolver sua própria metodologia para remover quaisquer observações espúrias que possam existir. A medida de altura da água de superfície do instrumento do IceSat tem a melhor precisão vertical com erros médios absolutos de aproximadamente 10 cm para o IceSat, (comparado, por exemplo, com 28 cm do Envisat).

Os dados altimétricos oriundos de Laser, tanto nas plataformas de avião ou satélite, ou obtidos por meio da interferometria são dados capazes de modelar o relevo, servindo também como opção para pontos de controle em situações onde erro padrão dos produtos cartográficos a serem avaliados sejam 3 vezes piores. No entanto, existem outros dados capazes de fazer o mesmo e com uma qualidade muito maior, que são os dados oriundos de medição de campo obtidos por meio do emprego de sistema de posicionamento global por satélite GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*).

A acurácia de um ponto de controle obtido por meio do GNSS varia em função do método adotado, modo absoluto ou pós-processado, além do tempo de rastreamento do mesmo. A acurácia pode variar desde 5 cm até 10 metros dependendo da forma que foi obtido.

O sistema GNSS é um sistema de posicionamento por satélite, composto por vários sistemas: o GPS (*Global Position System*), criado em 1973 pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos; o Galileo, que é um sistema criado pelos Europeus; o Glonass, que é um sistema criado pela Rússia; e o Beidou (Compass), que ainda não foi lançado, mas está previsto para ser lançado em 2020 pela China. Monico (2008).

O IBGE-PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) processa dados GNSS que foram coletados por receptores de dupla frequência (L1 e L2) no modo estático ou cinemático, por meio do uso de um programa para correções das efemérides, dos efeitos da ionosfera e troposfera. IBGE (2017).

Devido não ser possível definir analiticamente a superfície do Geoide, em função da distribuição irregular da massa no interior da Terra, o sistema GPS calcula as coordenadas

tendo como referência, um elipsoide, o WGS-84 (World Geodetic System 1984), que é a figura geométrica que melhor representa a Terra. Para converter a altitude do referido elipsoide para a superfície equipotencial de referência oficial do Brasil, é necessário aplicar um modelo de transformação disponibilizado pelo IBGE denominado de MAPGeo ou Modelo de Ondulação Geoidal. MONICO (2008).

Antes de avaliar qualquer dado, é necessário que os dados, tanto o que será avaliado como o de referência, estejam referenciado ao mesmo sistema, caso estejam com referências diferentes, estes devem ser convertidos, de modo a não induzir um erro que não é do produto.

#### **2.4.2 Parâmetros para avaliação de qualidade**

##### **a) Normas**

De acordo com a Organização Internacional de Normalização e conforme a ISO 19113, qualidade de dados é a totalidade de características de um produto capaz de satisfazer necessidades explícitas e implícitas.

Outra variável considerada na validação de dados geoespaciais é a quantidade de pontos de controle e sua distribuição espacial. Apesar de ser um item importante da avaliação da qualidade de qualquer produto cartográfico, não existe nenhum órgão que normatiza sobre este item, nem mesmo a CONCAR (Comissão Nacional de Cartografia), define a quantidade mínima em suas normas, ou seja, não existe uma legislação brasileira tratando deste tema.

Por outro lado, a teoria clássica da estatística estabelece uma grande quantidade de pontos, o que torna impraticável e extremamente caro realizar qualquer validação de produtos geoespaciais.

Em contrapartida, as instituições e sociedades denominadas NMAS (National Map Accuracy Standard), ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) e NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy), estipulam uma amostra de 20 pontos para uma folha topográfica, como quantidade mínima de pontos de controle de referência.

A normativa do IBGE intitulada: “Relatório de recomendações para levantamentos relativos estáticos – GPS”, adota a densidade de 1 ponto a cada 20 km<sup>2</sup> para áreas planas e de 1 ponto a cada 10 km<sup>2</sup> para áreas acidentadas. IBGE (2010).

Portanto, considerando que o presente estudo se pauta no conhecimento e análise da aplicação do MDE do território brasileiro, faz-se mister o uso da norma adotada pelo IBGE.

Para identificar e quantificar os erros que ocorrem em bases cartográficas do território brasileiro, a avaliação deve seguir o disposto no Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, que trata das Normas Técnicas da Cartografia Nacional.

Em seu artigo 8º, o Decreto 89.817 de 1984 estabelece que:

Art 8º - As cartas quanto à sua exatidão devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica - - PEC, seguinte o critério abaixo indicado:

1. Noventa por cento dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico - estabelecido.
2. Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas-de-nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico - estabelecido.

De acordo com o Decreto em questão, o PEC é um indicador de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a acurácia de trabalhos cartográficos e esta probabilidade corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão ( $PEC=1,6449*EP$ ), o que está expressamente disposto nos §§ do mesmo artigo 8º, *ex vi*:

§ 1º - Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos.

§ 2º - A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão -  $PEC = 1,6449 EP$ .

§ 3º - O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

§ 4º - Para efeito das presentes Instruções, consideram-se equivalentes as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro-Médio-Quadrático.

O artigo 9º do mesmo Decreto estabelece que:

Art 9º - As cartas, segundo sua exatidão, são classificadas nas Classes A, B e C, segundo os critérios seguintes:

a - Classe A

1 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,5 mm, na escala da carta, sendo de 0,3 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: metade da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de um terço desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

b - Classe B

1 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 0,8 mm na escala, da carta, sendo de 0,5 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente

2 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quintos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de dois quintos o Erro-Padrão correspondente.

c - Classe C

1 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Planimétrico: 1,0 mm na escala da carta, sendo de 0,6 mm na escala da carta o Erro-Padrão correspondente.

2 - Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrico: três quartos da equidistância entre as curvas-de-nível, sendo de metade desta equidistância o Erro-Padrão correspondente.

Para melhor compreensão, os dados especificados na legislação foram colocados em destaque conforme quadro 1.

Quadro 1 – PEC altimétrico Analógico

PEC altimétrico		1/25.000	1/50.000	1/100.000	1/250.000
	EQM	3,33 m	6,66 m	13,33 m	33,33 m
Classe A	ZE90	5 m	10 m	20 m	50 m
	EQM	4 m	8 m	16 m	40 m
Classe B	ZE90	6 m	12 m	24 m	60 m
	EQM	5 m	10 m	20 m	50 m
Classe C	ZE90	7,5 m	15 m	30 m	75 m

Fonte: Brasil. Decreto n. 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da Cartografia Nacional. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, ano 122, n. 120, 22 jun. 1984. Seção 1, p. 8884-8886.

Recentemente, o Exército Brasileiro elaborou uma nova tabela do PEC para avaliar produtos digitais, que classifica as cartas em A, B, C e D, conforme quadro 2.

Quadro 2 – PEC altimétrico digital

PEC altimétrico		1/25.000	1/50.000	1/100.000	1/250.000
	EQM	1,67 m	3,33 m	8,33 m	16,67 m
Classe A	ZE90	2,7 m	5,5 m	13,7 m	27 m
	EQM	3,33 m	6,66 m	16,66 m	33,33 m
Classe B	ZE90	5 m	10 m	25 m	50 m
	EQM	4 m	8 m	20 m	40 m
Classe C	ZE90	6 m	12 m	30 m	60 m
	EQM	5 m	10 m	25 m	50 m
Classe D	ZE90	7,5 m	15 m	37,5 m	75 m

Fonte: Exército Brasileiro, Departamento de ciência e tecnologia, Diretoria de Serviço Geográfico. Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) Editoração e impressão pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro, 2ª Edição, 09 Agosto 2011.

O EQM corresponde ao Erro-Padrão, que é uma forma de avaliar a diferença entre um estimador e o verdadeiro valor da quantidade estimada, e pode ser usado como uma medida do erro.

De acordo com estudos de Merchant (1982), a análise da exatidão cartográfica planialtimétrica, baseia-se em duas etapas: A análise de tendências (erros sistemáticos); e a

Análise da precisão (erros aleatórios). Existem normas tanto para a análise de tendências quanto para a análise da precisão.

Desta forma, a precisão está ligada exclusivamente ao erro aleatório, ou seja, a diferença entre a acurácia e a precisão é unicamente decorrente do erro sistemático que, uma vez eliminado, faz com que a acurácia seja sinônimo de precisão.

Destarte, dos motivos possíveis para o erro sistemático, ressaltam-se a falta de manutenção, de calibração do equipamento de medição, ou até mesmo utilização de parametrização inadequada no modelo matemático utilizado na geração do produto.

Uma medida de acurácia proposta por Gauss, denominada de Erro Quadrático Médio (EQM) foi apresentada por Mikhail; Ackermann (1976) e posteriormente por Wolf; Ghilani (1997), e apresentam acurácia como sendo o grau de proximidade de uma estimativa com o valor verdadeiro, enquanto precisão expressa o grau de consistência da grandeza medida com sua média.

De acordo com Merchant (1982), existem dois tipos de referência passíveis de serem utilizados na realização do controle de qualidade de um dado geoespacial, um deles é obtendo os dados de referência em campo, a partir de medição GNSS, o outro obtendo os dados de referência a partir de um outro produto cartográfico já existente, desde que mais preciso.

Merchant (1982), afirma que para coleta de pontos de controle, este deve ter precisão de um terço (1/3) do erro padrão da carta/mapa em análise, ou seja, 3 vezes mais acurado, de tal modo que os erros existentes nas coordenadas extraídas deste produto cartográfico, sejam desprezíveis em relação ao que será avaliado.

Segundo Carvalho & Silva (2018) ao compararem as normas internacionais e brasileira para a avaliação da acurácia, identificaram que as normas possuem um grau de confiança em 95% desde que os dados tenham sua distribuição normal quando realizado testes em solo exposto, e quando há presença de vegetação não mantém o mesmo grau de confiança em função da distribuição não ser normal.

#### b) Estatísticas planimétricas

Desta forma, para realizar uma avaliação planimétrica, primeiramente obtém-se as discrepâncias das coordenadas (E e N) do dado geoespacial a ser avaliado, comparadas com as coordenadas (E e N) do dado de referência na mesma posição, de acordo com a equação 1.

$$\Delta d_i = \sqrt{\Delta E_i^2 + \Delta N_i^2} \quad \text{Eq. 1}$$

onde  $\Delta E$  é a diferença entre as coordenadas da componente E, e  $\Delta N$  é a diferença entre as coordenadas da componente N.

sendo:

$$\Delta E_i = E_{imagem} - E_{referência}$$

$$\Delta N_i = N_{imagem} - N_{referência}$$

Na sequência, utilizando as discrepâncias resultantes da equação 1, coloca-se em ordem crescente os resultados, define-se a posição exata onde se localiza o registro que contempla 90% dos pontos, definindo o CE90 (Circular Error do valor de posição 90%), ou seja, garantindo que 90% dos valores de discrepâncias observados estão abaixo do referido valor. Após a determinação do valor do CE90, calcula-se o EQM (Erro Quadrático Médio), aplicando-se a equação 2.

$$EQM_{Plan.} = \sqrt{\frac{(\sum \Delta E^2) + (\sum \Delta N^2)}{n-1}} \quad \text{Eq. 2}$$

onde  $\Delta E$  é a diferença entre as coordenadas da componente E, e  $\Delta N$  é a diferença entre as coordenadas da componente N, e  $n$  é o número de pontos.

Para identificar possível erro sistemático, visando eliminá-lo do conjunto de dados avaliados, faz-se então a análise de tendência, que trata-se do teste “T” de Student e do teste Qui-Quadrado, pois estas são análises estatísticas das discrepâncias encontradas na comparação entre as coordenadas do dado avaliado com as coordenadas de referência.

No cálculo das discrepâncias nas duas direções, utilizam-se as equações 3 e 4.

$$\overline{\Delta N} = \sum_{i=1}^n \Delta N_i / n = (\sum_{i=1}^n (N_i^c - N_i^d)) / n \quad \text{Eq. 3}$$

$$\overline{\Delta E} = \sum_{i=1}^n \Delta E_i / n = (\sum_{i=1}^n (E_i^c - E_i^d)) / n \quad \text{Eq. 4}$$

onde:

$n$  = número de pontos de controle;

$N_i^c$  e  $E_i^c$  e  $E_i^d$  são coordenadas dos pontos de referência obtidos, por exemplo, com medição GPS ou documento cartográfico mais preciso e

$N_i^d$  e  $E_i^d$  são coordenadas dos pontos correspondentes no produto a ser avaliado.

Em seguida, são realizados os testes de hipóteses:

- Para a coordenada N:  
 $H_0: Se \Delta N = 0$  então N não é tendencioso.  
 $H_1: Se \Delta N \neq 0$  então N é tendencioso.
- Para a coordenada E:  
 $H_0: Se \Delta E = 0$  então E não é tendencioso.  
 $H_1: Se \Delta E \neq 0$  então E é tendencioso.

É realizado inicialmente o chamado “Teste de Tendências”, para um nível de confiança  $(1-\alpha)$ , que neste caso é de 90%, então, pode-se concluir que as coordenadas que têm variação média nula, não possuem tendência.

Pela distribuição “t” de Student é realizada a consulta da tabela, se o “t” calculado for menor do que o “t” da tabela com 1 grau de liberdade, então o mapa está livre de tendência.

Os valores de “t” para as coordenadas N e E são calculados por meio das equações 5 e 6:

$$t_N = (1/S_N) * \overline{\Delta N} * n^{1/2} \quad \text{Eq. 5}$$

$$t_E = (1/S_E) * \overline{\Delta E} * n^{1/2} \quad \text{Eq. 6}$$

onde:

$S_N$  e  $S_E$  correspondem aos desvios-padrão das discrepâncias nas direções N e E, sendo obtidos das Equações 7 e 8 que se seguem:

$$S_N = \left( \sum_{i=1}^n (\Delta N_i - \overline{\Delta N})^2 / (n-1) \right)^{1/2} \quad \text{Eq. 7}$$

$$S_E = \left( \sum_{i=1}^n (\Delta E_i - \overline{\Delta E})^2 / (n-1) \right)^{1/2} \quad \text{Eq. 8}$$

A partir da amostra (coordenadas observadas N e E) depois de calculados os respectivos desvio-padrão, calculam-se então, os valores do qui-quadrado nas direções N e E com a aplicação das equações 9 e 10, respectivamente:

$$\chi^2_{N, n-1} = [(n-1)/\sigma_N^2] / (S_n^2) \quad \text{Eq. 9}$$

$$\chi^2_{E, n-1} = [(n-1)/\sigma_E^2] / (S_E^2) \quad \text{Eq. 10}$$

Se  $\chi^2_{E, n-1} \leq \chi^2_{n-1, \alpha}$  então o documento cartográfico atende a precisão na direção E.

Se  $\chi^2_{N, n-1} \leq \chi^2_{n-1, \alpha}$  então o documento cartográfico atende a precisão na direção N.

#### c) Estatísticas altimétricas

Assim, uma avaliação altimétrica, segundo Souza et al. (2008), dar-se-á a partir do cálculo do EQM e da tolerância vertical ZE90 (Erro Linear do eixo Z). Desta forma, o valor do ZE90 é obtido de forma semelhante ao CE90, onde primeiramente coloca-se em ordem crescente os módulos das discrepâncias altimétricas obtidas por diferença simples entre a altitude do dado a ser avaliado pela altitude do dado de referência ( $\Delta H$ ), e depois determina-se a posição 90% do total dos registros. Este EQM é calculado pela equação 11.

$$EQM_{alt.} = \sqrt{\frac{(\sum \Delta H^2)}{N-1}} \quad \text{Eq. 11}$$

onde  $N$  é o número de pontos e  $\Delta H$  é a diferença de altitude

Os erros encontrados são oriundos de 3 fontes distintas: Erros Sistemáticos, normalmente causados por fontes conhecida e possíveis de serem eliminados ou compensados; Erros Aleatórios, causado por fatos imprevisíveis, mas que podem ser minimizadas com repetições das observações; e Erro Grosseiro, provocado pela imperícia do operador.

#### d) Tratamento dos outliers

O termo *outliers* já é de uso corrente na estatística e representam valores discrepantes no próprio conjunto de dados coletados, ou seja, valores que divergem bastante do padrão global dos demais dados observados. TRIOLA (2012).

É oportuno esclarecer que *outliers* influenciam nos cálculos de média, desvio padrão, histogramas, podendo distorcer conclusões sobre o conjunto de dados analisados. TRIOLA (2012).

Vários métodos de detecção de *outliers* podem ser encontrados nos estudos de Barnett e Lewis (1994). Um destes métodos é denominado por Barnett e Lewis (1994) de método *ad hoc*, e provém da Análise Exploratória de Dados (AED).

Ao longo dos anos, vários estudos foram realizados para a detecção de *outliers* via Análise Exploratória de Dados (AED), um dos primeiros autores a estudar *outliers* via AED foi Tukey (1977), que apresentou as equações 12 e 13:

$$O.I. < Q1 - 1,5 * (Q3 - Q1) \quad \text{Eq. 12}$$

$$O.S. > Q3 + 1,5 * (Q3 - Q1) \quad \text{Eq. 13}$$

onde O.I. representa o Outlier Inferior  
 onde O.S. representa o Outlier Superior  
 onde Q1 representa o 1º quartil  
 onde Q3 representa o 3º quartil

Outros trabalhos, como o de Kimber (1990) procuraram modificar a ideia original de Tukey (1977), alterando-se somente os valores dos quartis, porém, para o referido estudo, foi utilizado a proposta de Tukey (1977) para identificação e eliminação dos *Outliers*.

#### e) Técnicas de amostragem

Quando o volume de dados a serem avaliados é grande, impactando a operacionalização da referida avaliação, como foi o caso do IBGE ao avaliar o mapeamento da BC250 (Base Contínua na escala de 1/250.000) ao longo de todo o território brasileiro, aplicou-se o método de amostragem, reduzindo custos, tempo e recursos humanos envolvidos na referida avaliação.

As técnicas de amostragem probabilísticas ou aleatórias desenvolveram-se, sob o aspecto teórico, principalmente a partir da década de 30. Marconi; Lakatos (2002).

A norma ISO 19157:2013 apresenta uma diretriz para a definição de amostras e métodos de amostragem para dados geográficos.

Esta norma considera dois aspectos principais para a estratégia de coleta de amostras: os itens a serem amostrados (por área ou por feição) e a maneira pela qual os mesmos são selecionados: Aleatórias ou Não aleatórias. (quadro 3)

Quadro 3 – Tipos de amostragem

Amostragens probabilística	Amostragens não probabilística
Amostragem sistemática	Amostragem por cotas
Amostragem aleatória simples	Amostragem por conveniência
Amostragem por estratificação	Amostragem intencional ou por julgamento
Amostragem de conglomerados	Bola de neve (Snowball)

Fonte: Yamamoto; Landim (2015)

A relação entre tamanho do lote, com o tamanho da amostra, e com o grau de confiabilidade é dado pelo Nível de Qualidade Aceitável (NQA), o quadro 4 apresenta esta relação, onde é possível definir o número de amostra em função do total de dados, levando em consideração o grau de confiabilidade esperado do resultado.

Quadro 4 – Padrão do nível de qualidade aceitável

Padrão do Nível de Qualidade Aceitável (NQA)											
Letra Código	Tamanho Da Amostra	Nível de Qualidade Aceitável (NQA) em %									
		0,4	0,65	1,0	1,5	2,5	4,0	6,5	10	15	25
A	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
B	3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
C	5	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3
D	8	0	0	0	0	0	1	1	2	3	5
E	13	0	0	0	0	1	1	2	3	5	7
F	20	0	0	0	1	1	2	3	5	7	10
G	32	0	0	0	1	2	3	5	7	10	14
H	50	0	0	1	2	3	5	7	10	14	21
J	80	1	1	1	3	5	7	10	14	21	21
K	125	1	1	2	5	7	10	14	21	21	21
L	200	2	2	3	7	10	14	21	21	21	21
M	315	3	3	5	10	14	21	21	21	21	21
N	500	5	5	7	14	21	21	21	21	21	21
P	800	7	7	10	21	21	21	21	21	21	21
Q	1250	10	10	14	21	21	21	21	21	21	21
R	2000	14	14	21	21	21	21	21	21	21	21

Tamanho do Lote		Níveis gerais de Inspeção			
		I	II	III	
2	a	8	A	A	B
9	a	15	A	B	C
16	a	25	B	C	D
26	a	50	C	D	E
51	a	90	C	E	F
91	a	150	D	F	G
151	a	280	E	G	H
281	a	500	F	H	J
501	a	1200	G	J	K
1201	a	3200	H	K	L
3201	a	10000	J	L	M
10001	a	35000	K	M	N
35001	a	150000	L	N	P
150001	a	500000	M	P	Q
500001	a	Maiores	N	Q	R

Fonte: Brasil. Exército. Diretoria de Serviço Geográfico. Norma da especificação técnica para controle de qualidade de dados geoespaciais (ET-CQDG). 1. ed. Brasília, DF, 2016. p. 94

#### f) Elementos de qualidade

Os elementos e subelementos pertinentes numa avaliação de produtos geoespaciais, apresentam-se no quadro 5.

Quadro 5 – Elementos de qualidade de dados espaciais

Elemento	Subelemento
Consistência lógica	Consistência conceitual
	Consistência de domínio
	Consistência de formato
	Consistência topológica
Compleitude	Comissão
	Omissão
Acurácia posicional	Acurácia absoluta
	Acurácia relativa
	Acurácia posicional dos dados em grade
Acurácia temática	Correção da classificação
	Grau de correção dos atributos não quantitativos
	Acurácia dos atributos quantitativos
Acurácia temporal	Acurácia de uma medida temporal
	Consistência temporal
	Validade temporal
Usabilidade	

Fonte: International Organization for Standardization. ISO 19157:2013: Geographic information: data quality. Geneva: ISO, 2013c. 146p.

Na quadro 5 acima apresentada, os elementos são identificados da seguinte forma:

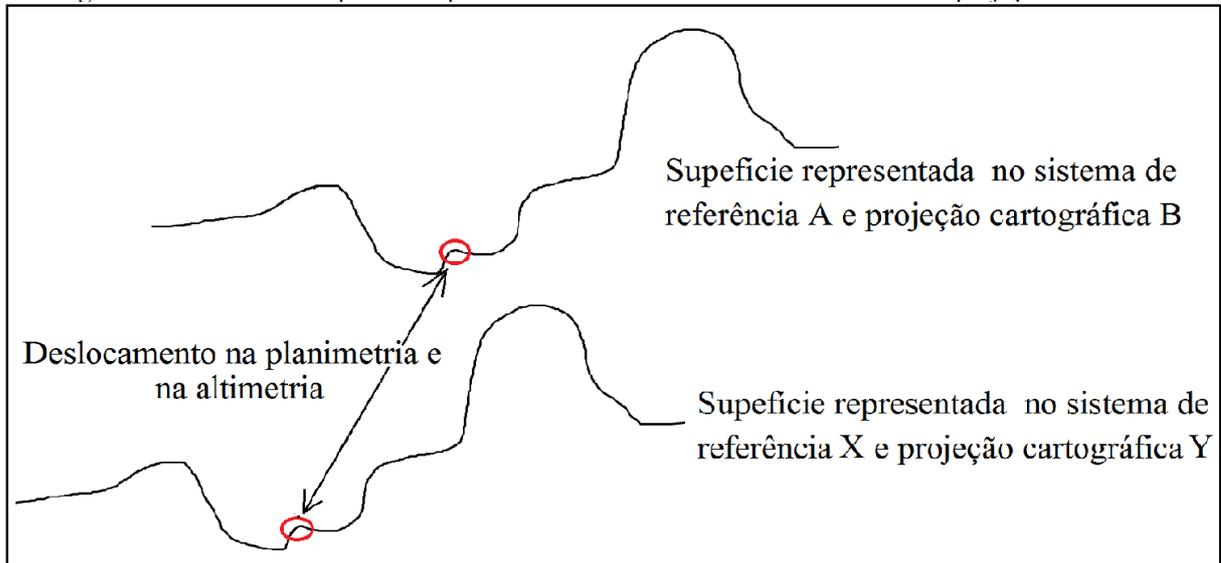
- Consistência lógica: refere-se à estrutura dos dados, formato e correlacionamento entre as feições;
- Compleitude: refere-se à ausência ou presença de uma feição indevida;
- Acurácia posicional: refere-se ao deslocamento entre o dado a ser avaliado com o dado considerado como verdade;
- Acurácia temática refere-se à classificação da feição e
- Acurácia temporal refere-se à data de aquisição do dado com possíveis alterações.

Para avaliar a planimetria e/ou a altimetria de um dado geoespacial, este deve estar com as mesmas configurações (sistema de referência e projeção) dos dados de referência, denominados de pontos de controle, que são considerados como verdade e serão utilizados no processo de validação, sobre os quais far-se-á uma descrição minuciosa adiante.

A figura 2 ilustra duas superfícies representadas com diferentes projeções e/ou sistemas de referência, com isso, obtendo um deslocamento tanto na planimetria quanto na altimetria, gerando uma discrepância entre as superfícies, fazendo com que o produto seja

reprovado indevidamente, o que demonstra a importância de deixar os dados no mesmo sistema, isto é, representado sobre uma mesma superfície de referência.

Figura 2 – Uma mesma superfície representada em dois sistemas de referência e/ou projeções diferentes



Fonte: Elaborado pelo autor

Para avaliação de MDE, muitos estudos utilizam como referência, pontos de controle medidos em campo com GNSS, com por exemplo, foi o estudo de Chagas et al. (2010), que para avaliação de MDE's globais na bacia hidrográfica de São Domingos, contemplando uma área de 28.000 ha, situado na região norte fluminense do Estado do Rio de Janeiro, foram utilizados pontos GPS medido em campo, sendo 18 pontos medidos com um modelo da marca da TRIMBLE e 194 pontos da marca ASHTECH, onde estes foram pós-processado para obtenção de precisão submétrica, objetivando o cálculo do RMSE.

Já no estudo de Nakahori (2010), foram utilizados pontos de controle medidos por meio do sistema de posicionamento por satélite (GPS) de duas frequências, L1 (1575,42 MHz) e L2 (1227,60 MHz), com taxa de 15 segundos para determinação das estações básicas e apenas com a L1 para a determinação dos pontos móveis, cujos pontos tiveram em média um RMSE altimétrico de 2 cm.

Os estudos de Höhle; Pedersen (2010) e Mozas et al. (2013), indicam que são em áreas com relevo movimentado que ocorrem as maiores distorções tanto na planimetria quanto na altimetria. De acordo com Höhle; Pedersen (2010), erros planimétricos de maior magnitude podem propagar e gerar erros altimétricos em áreas inclinadas.

Segundo estudos de Höhle; Pedersen (2010), métodos de levantamentos com sistemas de perfilamento a laser (LIDAR) normalmente apresentam discrepâncias planimétricas

maiores do que as altimétricas, indicando que os erros planimétricos são derivados por meio de correlação entre elevações.

Rao (2004) em experimentos de campo avaliando o MDE SRTM, encontrou erros menores na vertical e maiores na horizontal, o que chama a atenção, conforme já indicado em outros estudos como o de Höhle; Pedersen (2010), para a necessidade de validação também para o deslocamento horizontal do dado. De acordo com Mozas et al. (2013), as discrepâncias horizontais e verticais aumentam proporcionalmente à medida que a inclinação do terreno aumenta.

Alguns estudos indicam formas diferentes de avaliar a acurácia posicional de um MDE, como é o caso do estudo de Vosselman (2008), o qual afirma que um método de avaliar MDE é comparando as distâncias entre as quinas de telhados com os dados do MDE. Ferreira (2014) afirma que um outro método de avaliar MDE é comparando a distância entre quinas das edificações extraídas de dados LIDAR com pontos de controle oriundos da fotogrametria digital. Reinoso (2011) indica um outro método de avaliar a acurácia posicional planimétrica de um MDE comparando curvas de nível homólogas a partir de outro MDE mais acurado. Mozas et al. (2013) indicam métodos de comparações entre linhas de cumeeiras com outro MDE de melhor qualidade.

## 3 MATERIAIS E MÉTODO

### 3.1 MATERIAIS

Foram usados os materiais, produtos e softwares descritos:

- MDE com 1" de arco com resolução de 30 metros do SRTM, referenciado altimetricamente à superfície equipotencial EGM 96 (Earth Gravitational Model 1996) e planimetricamente ao elipsoide WGS-84, no sistema de coordenadas geográficas lat./long. obtido no site: <http://dwtkns.com/srtm30m/>;
- MDE com 3" de arco com resolução de 90 metros do SRTM, referenciado altimetricamente à superfície equipotencial EGM 96 e planimetricamente ao elipsóide WGS-84 com projeção cartográfica UTM (*Universal Transversa de Mercator*) obtido no site: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/>;
- Imagem SAR do ALOS/PALSAR com resolução de 12,5 metros, referenciado altimetricamente e planimetricamente ao elipsoide WGS-84 no sistema de coordenadas geográficas lat./long. obtido no site: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>;
- Pontos de controle obtidos por meio de medição de campo baseado em sistema de posicionamento por satélite (PPP), obtidos no IBGE, referenciados planimetricamente ao elipsoide GRS-80 (Geodetic Reference System 1980) e altimetricamente referenciado à superfície equipotencial MAPGeo 2015 e no sistema de coordenadas geográficas lat./long;
- Pontos altimétricos gerados pelo satélite IceSat, obtidos do IBGE já convertidos planimetricamente para o GRS-80 e altimetricamente à superfície equipotencial do MAPGeo 2015 e no sistema de coordenadas geográficas lat./long;
- Mapa de declividade do Brasil, no formato matricial referenciado planimetricamente ao elipsoide GRS-80 no sistema de coordenadas geográficas lat./long. obtido no site: <https://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Mapa-de-Declividade-em-Percentual-do-Relevo-Brasileiro-3497.html>;
- MDE do Estado de Pernambuco, gerado por perfilamento a LASER, com 1 metro de resolução, referenciado planimetricamente ao elipsoide GRS-80 e altimetricamente à superfície equipotencial MAPGeo 2015 com projeção cartográfica UTM obtido no IBGE;
- Dados de drenagem no formato vetorial do mapeamento do Estado do Rio de Janeiro na escala de 1/25.000 obtido no IBGE, referenciado planimetricamente ao elipsoide

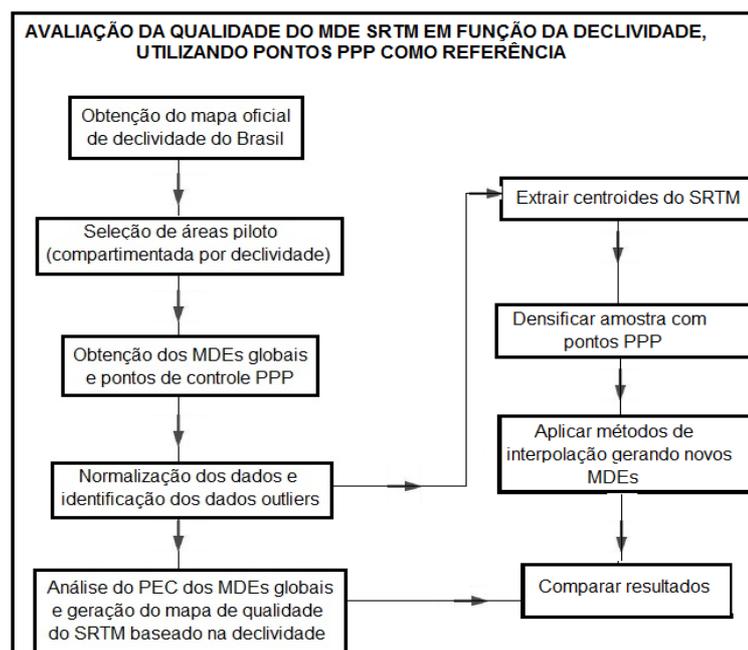
GRS-80 e altimetricamente à superfície equipotencial MAPGeo 2015 com projeção cartográfica UTM;

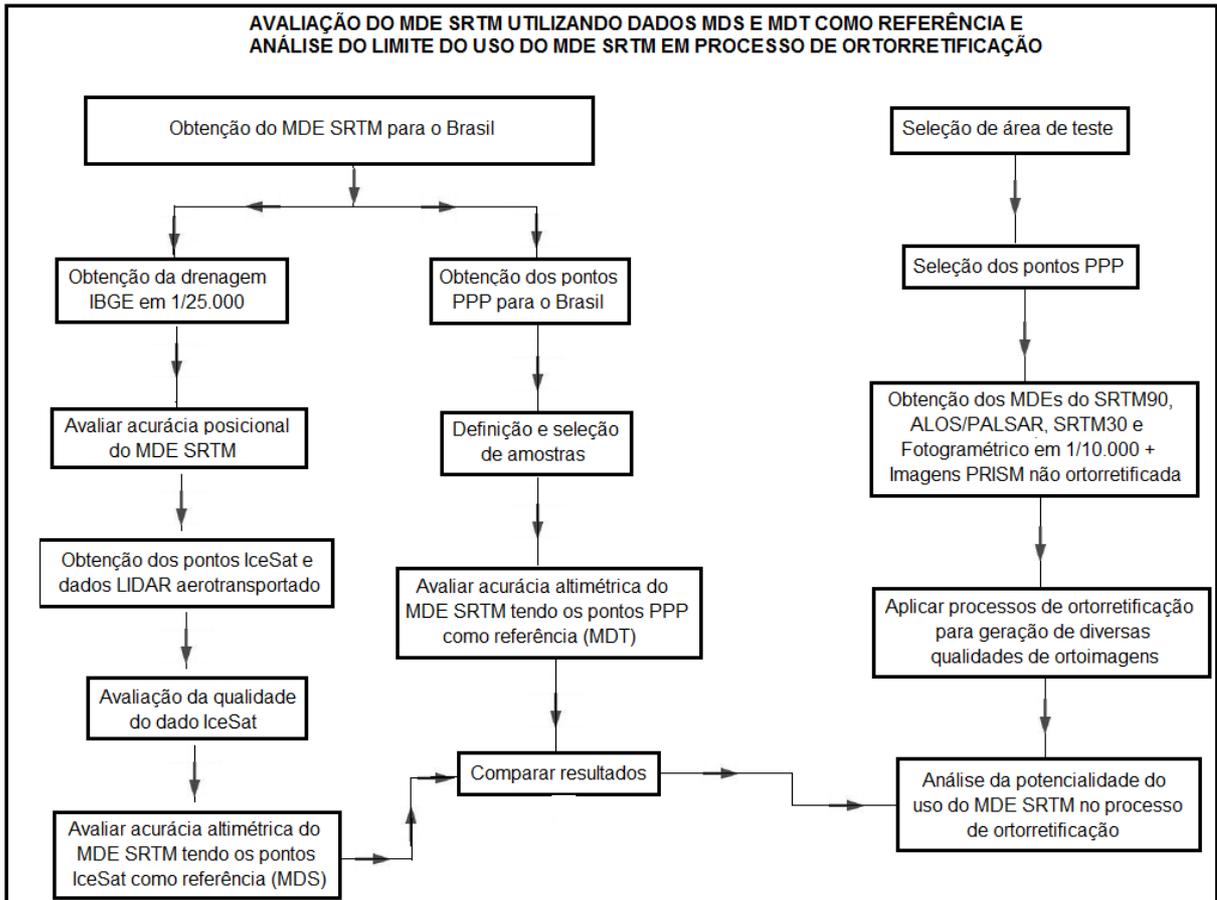
- Imagens ALOS/PRISM não ortorretificada com resolução de 2,5 metros, em 3 visadas (Nadir, Backward e Forward) cada uma com 4 bandas separadamente, obtidas do IBGE;
- MDE do município de Itaguaí oriundo de aerofotogrametria com resolução de 1 metro, referenciado planimetricamente ao elipsoide GRS-80 e altimetricamente à superfície equipotencial MAPGeo 2015, com projeção cartográfica UTM obtido do IBGE; e
- Softwares Qgis 2.14.3 (utilizado em todas as etapas de avaliação da qualidade de dados geospaciais), ArcGis 9.3 (utilizado no processo de interpolação para a geração de novos MDE's), MAPGeo 2015, R com R Studio, PROGRID - programa de transformação de coordenadas, Geoid Height Calculator (Usado para realizar a conversão do EGM96 para o WGS84) e o ENVI 5.3 (utilizado no processo de geração de ortofoto).
- Articulação da folha 1/250.000 do mapeamento sistemático brasileiro.

### 3.2 MÉTODO

Os processos metodológicos da presente pesquisa foram estruturados de acordo com a figura 3, conforme a descrição dos passos que serão apresentados.

Figura 3 – Fluxograma das atividades



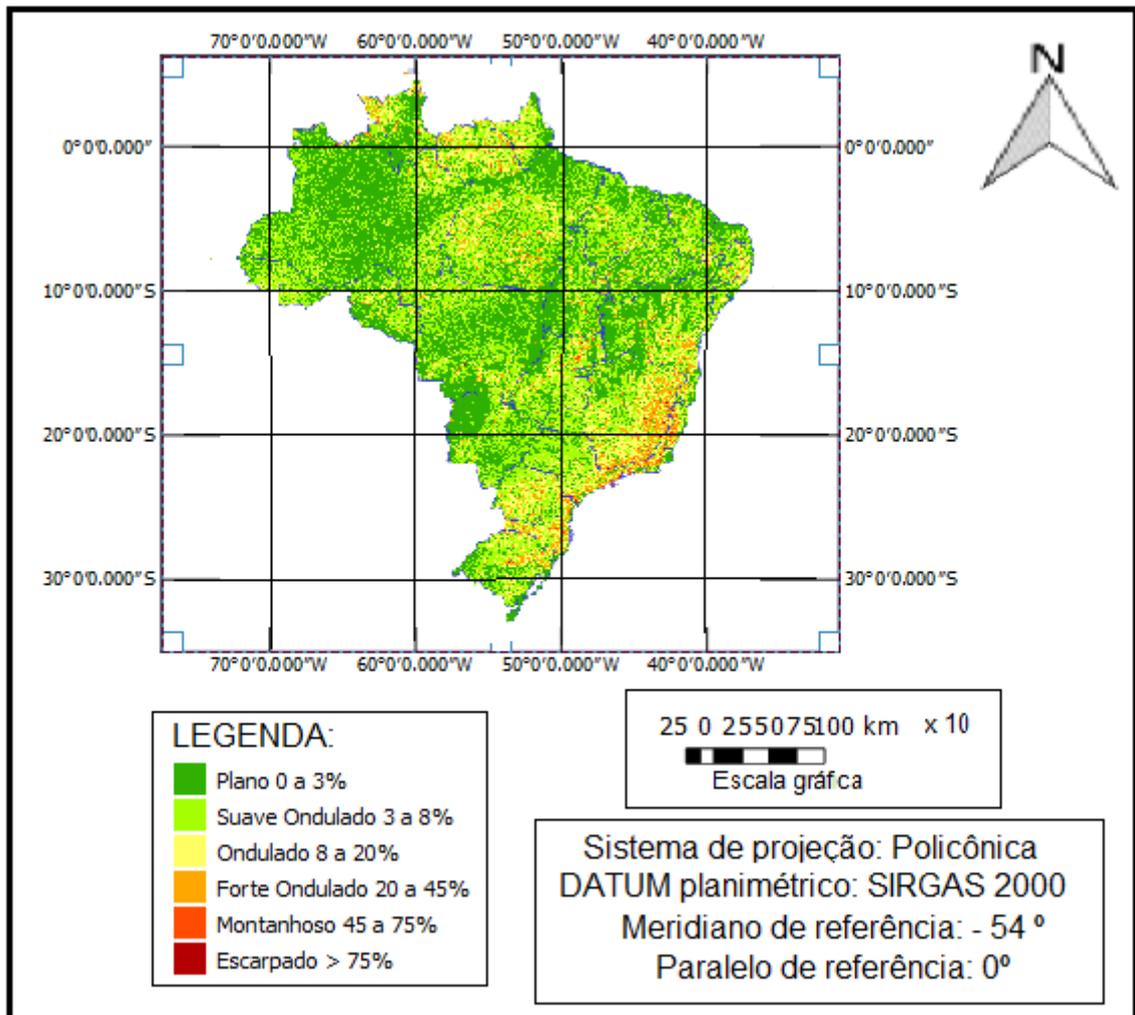


Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.2.1 Seleção de áreas piloto (compartmentadas por classes de declividade)

O primeiro passo realizado neste trabalho foi obter o mapa de declividade oficial do Brasil para na sequência identificar e delimitar as áreas piloto compartmentadas por classe de declividade, considerando a base matricial de declividade oficial do Brasil (figura 4).

Figura 4 – Mapa de declividade do Brasil

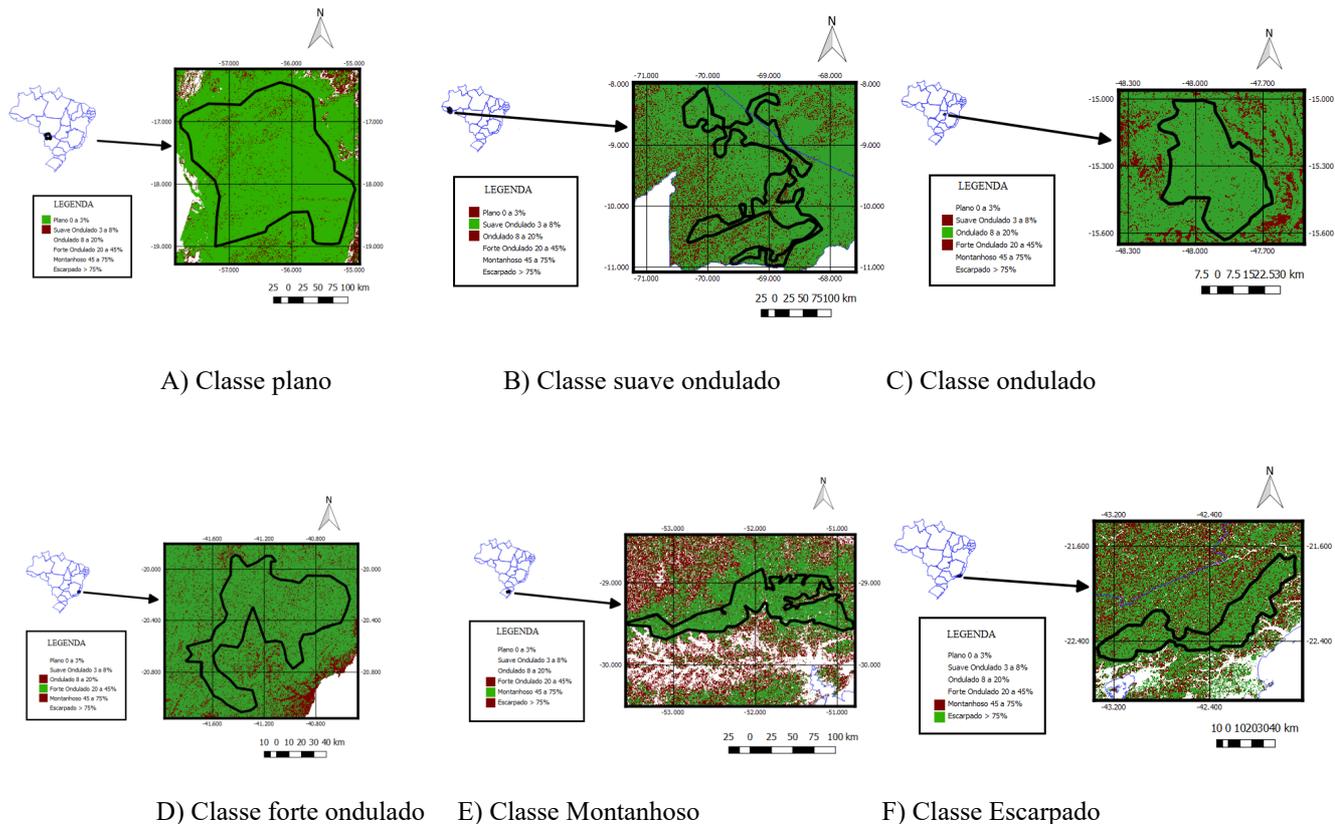


Fonte: Mapa de declividade elaborado pela CPRM

Foram selecionadas 6 áreas, isto é, uma para cada classe de declividade: plano (0 a 3%), suave ondulado (3 a 8%), ondulado (8 a 20%), forte ondulado (20 a 45%), montanhoso (45 a 75%) e escarpado (acima de 75%).

A figura 5 ilustra as 06 áreas piloto selecionadas para a avaliação dos modelos digitais de elevação globais, tendo como valores de comparação, as altitudes dos pontos PPP.

Figura 5 – Delimitação das áreas com diferentes classes de declividade



Fonte: Mapa de declividade fornecido pela CPRM

Apesar de ter como objetivo a seleção de áreas compartmentadas por classes de declividade, não foi possível delimitar grandes áreas ao longo do território brasileiro com apenas uma única classe de declividade, este resultado era esperado porque dificilmente haverá uma área de grande dimensão com um único tipo de declividade em função da variabilidade da topografia.

O critério de delimitação das áreas piloto foi que além da classe desejada, houvesse apenas as classes vizinhas, desde que a menor presença possível não ultrapassando 10% do total da classe desejada.

A área selecionada tendo sua declividade classificada como sendo do tipo plano foi parte do norte do Estado do Mato Grosso do Sul e parte do sul do Estado do Mato Grosso, com pouco mais de 50.000 km<sup>2</sup>, conforme mostra a figura 5 A.

Além desta, foi delimitada também uma área ao leste do Estado do Acre, com pouco mais de 16.000 km<sup>2</sup>, tendo sua declividade classificada como sendo do tipo suave ondulado, conforme figura 5 B.

Já para a declividade classificada como sendo do tipo ondulado foi escolhida uma área na parte noroeste do Distrito Federal, pegando parte do Estado de Goiás, com pouco mais de 2.000 km<sup>2</sup>, de acordo com a figura 5 C.

Uma área na parte sul do Estado do Espírito Santo e parte do Estado de Minas Gerais, totalizando pouco mais de 6.000 km<sup>2</sup>, cuja declividade é classificada como sendo do tipo forte ondulado, foi demarcada também para avaliação conforme mostra a figura 5 D.

A figura 5 E ilustra uma área da parte centro-leste do Estado do Rio Grande do Sul e da serra gaúcha, com pouco mais de 9.000 km<sup>2</sup>, onde sua declividade é classificada como sendo do tipo montanhoso, a qual será objeto de estudo.

Foi selecionada uma área da parte central do Estado do Rio de Janeiro constituída pela serra de Petrópolis, Teresópolis, Silva Jardim e outras, acumulando uma área de pouco mais de 4.000 km<sup>2</sup>, tendo sua declividade classificada como sendo do tipo escarpado, conforme mostra a figura 5 F.

### **3.2.2 Normalização dos dados e identificação dos dados espúrios (*outliers*)**

O passo seguinte deste estudo foi obter os dados dos MDEs globais e pontos PPP disponíveis nestas áreas selecionadas para então normalizar todos os dados de forma que todos estivessem no mesmo sistema de referência e/ou coordenadas.

Considerando que pode haver distorções entre as superfícies de referência do MDE SRTM (EGM 96) e dos pontos de controle PPP selecionados (MAPGeo 2015), converteu-se os dados do MDE SRTM para a mesma superfície de referência dos pontos de controle, analisando-se, assim, a influência dessa discrepância neste trabalho.

Esta conversão se deu convertendo-se do EGM 96 para o WGS-84 por meio de uma ferramenta de conversão desenvolvida pela NASA denominada de “Geoid Height Calculator”, disponível no *site* <<https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/geoid-height-calculator/geoid-height-calculator.html>>, e posteriormente de WGS-84 para a superfície equipotencial oficial do Brasil aplicando o software MAPGeo 2015 disponível no site do IBGE.

A seguir, calculou-se, para cada conjunto de pontos, ou seja, para cada uma das 6 áreas, separadamente, a diferença entre as altitudes dos pontos de controle medidos em campo e as altitudes do MDE SRTM obtidas nas mesmas posições geográficas.

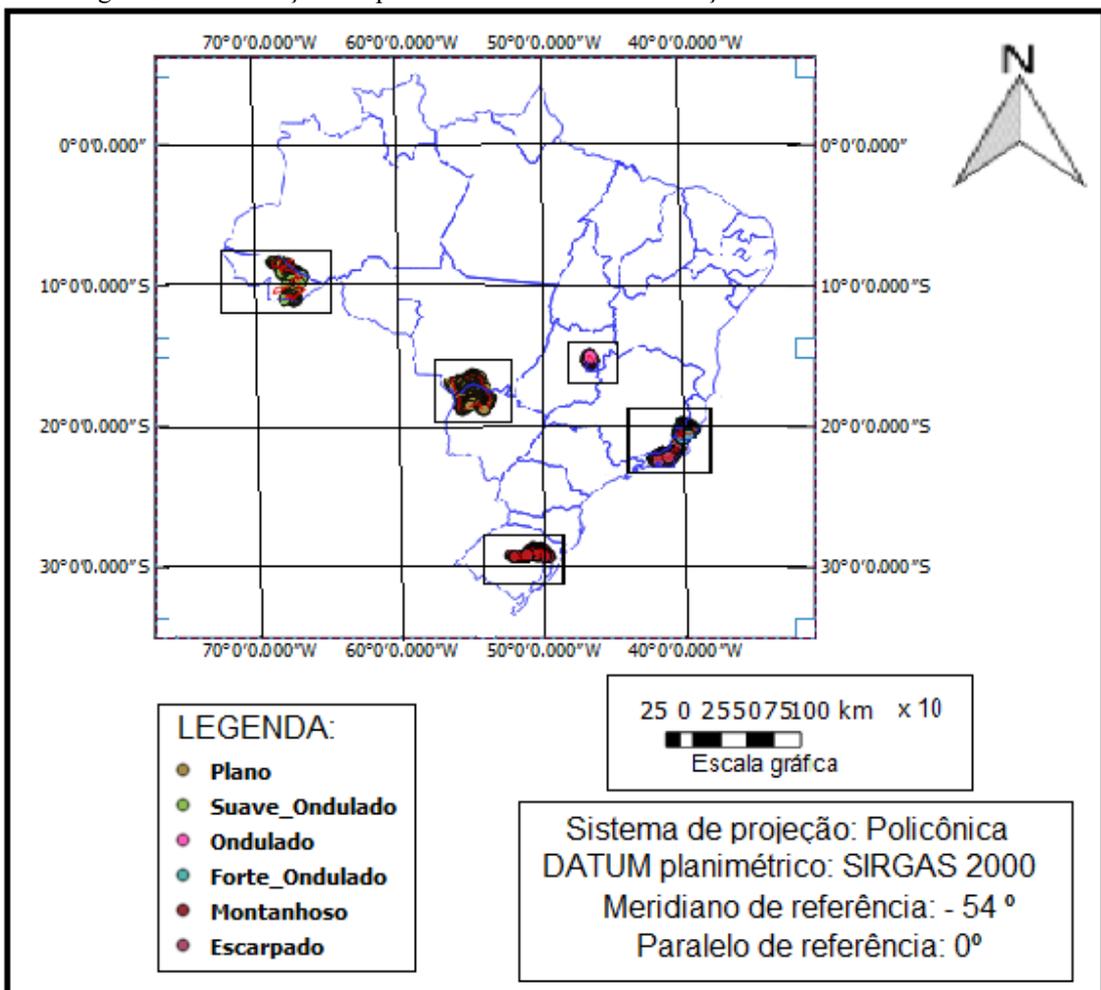
Foram utilizados como referência (verdade de campo), pontos de controle obtidos em campo, por meio de medição do sistema de posicionamento global por satélite.

Os pontos de controle foram medidos nas áreas piloto, em função da classe de declividade, sendo distribuídos da seguinte forma: 309 pontos na área plana, 102 pontos na área suave ondulado, 58 pontos na área ondulada, 248 pontos na área forte ondulado, 222 pontos na área montanhosa e por fim 511 pontos na área escarpada.

Os dados PPP selecionados são pontos medidos em cruzamento de vias, limites de propriedades como canto de cercas ou muros ou até mesmo em quinas de telhado, sendo sempre todos processados a nível do solo.

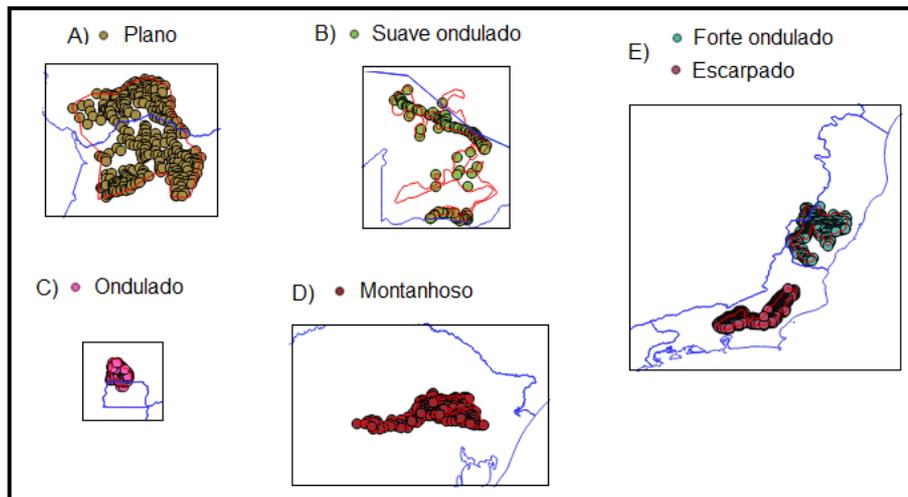
As figuras 6 e de 6a até 6e ilustram as áreas selecionadas, assim como a distribuição dos pontos de controle (PPP), tendo sido obtidos: 2 áreas na região sudeste para as classes forte ondulado e escarpado, 2 áreas no centro-oeste para as classes ondulado e plano, 1 área na região sul para a classe montanhoso e 1 área na região norte para a classe suave ondulado.

Figura 6 – Distribuição dos pontos de controle PPP em função das classes de declividade



Fonte: Mapa de limites estaduais elaborados pelo IBGE

Figuras 6a, b, c, d, e – Separação das áreas por classe de declividade



Fonte: Elaborado pelo Auto

Vale ressaltar que não houve seleção em nenhuma área na região nordeste, uma vez que as classes de declividade ali presentes já foram selecionadas nas demais regiões do Brasil.

Para a normalização dos dados planimétricos, foram convertidos os dados de WGS-84 para GRS-80, elipsoide de referência do SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) e as projeções cartográficas de UTM para geodésica (latitude e longitude).

Finalmente, passa-se ao cálculo da diferença entre as altitudes dos pontos de controle medidos em campo (pontos PPP) e as altitudes do MDE SRTM obtidas nas mesmas posições geográficas dos pontos de campo utilizados como referência. Esta diferença é o valor utilizado para determinar os quartis para a identificação dos dados espúrios.

Assim, aplicou-se as equações 12 e 13, de Tukey (1977):

$$O. I. < Q1 - 1,5 * (Q3 - Q1) \quad \text{Eq. 12}$$

onde O.I. representa o Outlier Inferior  
 onde Q1 representa o 1º quartil  
 onde Q3 representa o 3º quartil

$$O. S. > Q3 + 1,5 * (Q3 - Q1) \quad \text{Eq. 13}$$

onde O.S. representa o Outlier Superior  
 onde Q1 representa o 1º quartil  
 onde Q3 representa o 3º quartil

Para aplicar as referidas equações, foram selecionados pontos de controle, dos quais gerou-se, a partir do Qgis, um arquivo vetorial do tipo ponto para cada área delimitada, onde, cada ponto de controle contém: a informação da altitude do MDE SRTM, a altitude ortométrica do ponto de controle, a diferença entre o EGM 96 e o WGS-84, e a ondulação geoidal nas respectivas posições geográficas.

Vale ressaltar que foram identificados e excluídos os dados *outliers* 6 vezes, isto é, um conjunto de dados *outliers* para cada área piloto em função da variação da declividade da topografia.

### **3.2.3 Análise do PEC dos MDEs globais e geração do mapa de qualidade do MDE SRTM baseado na declividade**

De posse dos dados originais e convertidos do MDE SRTM, calculou-se a diferença entre as respectivas altitudes de cada área selecionada.

Para avaliar a real necessidade de conversão dos dados altimétricos do MDE SRTM de EGM 96 para o MAPGeo 2015, tendo em vista que ambas são superfícies equipotenciais, utilizou-se a plataforma do QGIS – Programa de Geoprocessamento Versão 2.14.3, onde foi criada a tabela denominada “Valida\_SRTM\_Classe\_Declividade”, realizando-se o seguinte procedimento:

- Criou-se 2 campos, denominados de “DeltaH\_EGM” e “DeltaH\_Map”, sendo o primeiro contendo as diferenças entre as altitudes do MDE SRTM referenciada ao EGM 96 e os pontos de controle referenciados ao MAPGeo 2015; e o segundo contendo as diferenças entre as altitudes do MDE SRTM convertidos para o MAPGeo 2015 e as altitudes dos pontos de controle referenciados ao mesmo MAPGeo 2015.
- O campo denominado de “DeltaH\_EGM” é calculado subtraindo o valor da altitude do MDE SRTM, sem a conversão de EGM 96 para o MapGeo 2015, com o valor da altitude dos pontos PPP referenciados ao MapGeo 2015.
- O campo denominado de “DeltaH\_Map” é calculado subtraindo o valor da altitude do MDE SRTM convertido de EGM 96 para o MapGeo 2015, com o valor da altitude dos pontos PPP referenciados ao MapGeo 2015.

Passou-se, então ao cálculo do EQM e determinação do ZE90 para os dois resultados de discrepâncias, indicando a classificação do PEC para cada uma das 6 áreas piloto.

Para o cálculo do EQM, utilizou-se o *script* elaborado em 2007 pelo IBGE, e que foi cedido para uso na presente pesquisa, aplicando a equação 11, já, para se determinar o ZE90, o *script* ordena de forma crescente o módulo das diferenças de altitudes calculadas de cada conjunto de dados, indicando o valor presente na posição equivalente a 90% da quantidade total de pontos de referência, por exemplo, considerando um conjunto de 10 pontos de controle, o ZE90 será o valor do 9º ponto, após o ordenamento crescente pelo *script*.

$$EQM_{alt.} = \sqrt{\frac{(\sum \Delta H^2)}{N-1}} \quad \text{Eq. 11}$$

onde  $\Delta H$  representa a diferença de altitudes, entre as altitudes dos MDE's globais e as altitudes dos pontos de referência.

onde  $N$  representa o número de pontos de controle para cada conjunto de pontos.

Em seguida gerou-se um arquivo vetorial do tipo ponto, armazenando registros em uma tabela com valores de altitude dos pontos de controle (referência) numa coluna e dos MDEs globais em outras 3 colunas desta mesma tabela.

A partir deste arquivo vetorial, calculou-se para cada conjunto de dados das 6 áreas piloto, a diferença da altitude dos MDEs globais em relação ao ponto de controle, subtraindo os valores da coluna referente à altitude de cada MDE com a altitude dos pontos de referência (pontos de campo).

Desta forma foi possível calcular o EQM para cada uma das 6 áreas piloto com a aplicação da equação 11, bem como determinar os respectivos valores do ZE90 com a aplicação do script desenvolvido no programa R pelo IBGE.

A partir dos valores do EQM e do ZE90 obtidos nas 6 áreas piloto, classificou-se o PEC em cada área e gerou-se o mapa da qualidade do MDE SRTM ao longo de todo o território brasileiro. Para esta etapa, foi realizado o seguinte procedimento: Os atributos do mapa de declividade do Brasil foram substituídos pelos respectivos PECs classificados.

### 3.2.4 Refinamento do MDE SRTM

O procedimento seguinte teve por objetivo de identificar o método de interpolação que obtenha o melhor resultado no refinamento do MDE SRTM para cada classe de declividade, utilizando pontos PPP como pontos condicionantes nos modelos.

O primeiro passo desta etapa foi extrair, para cada área piloto, os centroides dos *pixels* do MDE SRTM, obtendo um arquivo vetorial do tipo ponto em forma de grade com distância de 30 metros entre os mesmos contendo a informação altimétrica para cada centroide, o passo seguinte foi densificar esta amostra, incluindo os pontos PPP medidos em campo por meio de sistema de posicionamento global. Estes pontos de campo estão em forma de grade com distância de 5 km entre os mesmos.

O segundo passo foi interpolar os pontos, para cada área piloto delimitada por classe de declividade, por meio da aplicação de diversos métodos de interpolação, sendo eles: krigagem, vizinho mais próximo, TIN, IDW e Topo to Raster.

O terceiro passo foi avaliar o PEC dos novos MDEs gerados nesta etapa, e para isso, selecionou-se pontos PPP que não foram utilizados na densificação da amostra.

Os valores das diferenças das altitudes, que foram obtidos subtraindo as altitudes do MDE interpolado pelas altitudes dos pontos PPP nas respectivas posições geográficas, permitiu o cálculo do EQM, a determinação do ZE90 e, finalmente, a classificação do PEC para cada um dos 30 novos MDEs gerado.

Os parâmetros utilizados nos processos de interpolação foram: Resolução de 10 m em todos os processos, e para o método da krigagem, o padrão do semivariograma esférico, tipo ordinário, em razão do estudo não ter como objetivo analisar especificamente o semivariograma mais indicado, ou seja, com menor RMSE.

Após a obtenção dos resultados, fez-se uma comparação dos resultados da qualidade do MDE SRTM original com o MDE interpolado para cada área piloto selecionada neste estudo.

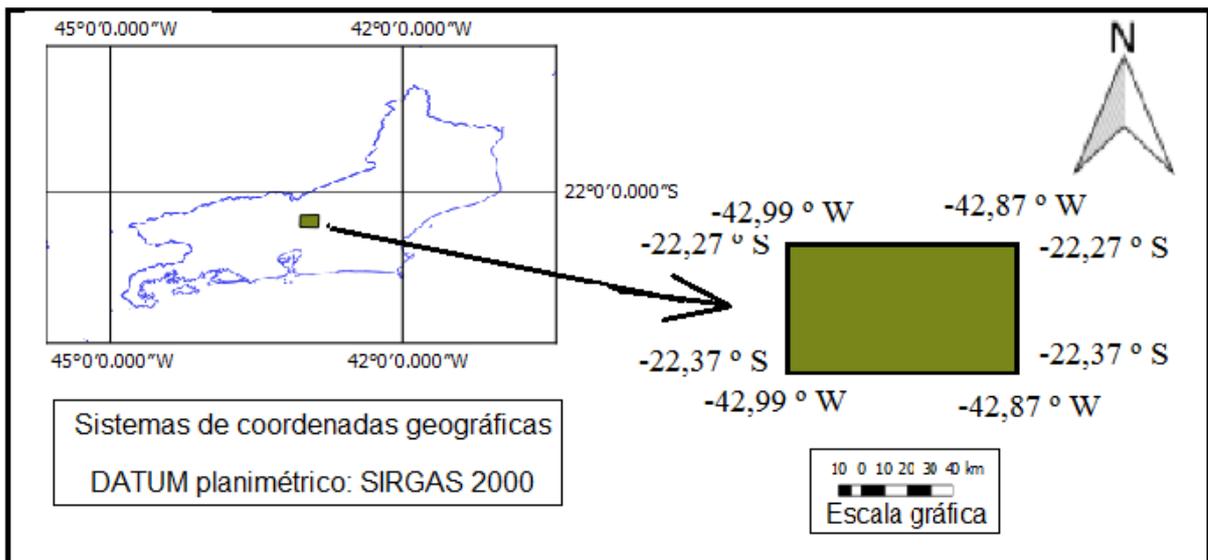
### **3.2.5 Avaliação da acurácia posicional do MDE SRTM**

Segundo os estudos de Höhle; Pedersen (2010) e Mozas et al. (2013), são em áreas com relevo movimentado que ocorrem as maiores distorções tanto na planimetria quanto na altimetria, portanto, foi necessário a seleção de uma área de declividade acentuada, onde houvesse dados de referência com qualidade superior.

Sendo assim, para avaliar a planimetria do MDE SRTM, considerando o padrão estabelecido de referência por Merchant (1982), foram necessários dados de referência que possibilitassem a identificação de pontos homólogos entre os respectivos dados de referência e o MDE SRTM.

Portanto, considerando a classe de declividade e a qualidade necessária para os dados de referência, selecionou-se uma parte da região serrana do Estado do Rio de Janeiro, abrangendo parte do município de Petrópolis e de Teresópolis, conforme ilustra a figura 7, cuja declividade é classificada como sendo do tipo escarpado, com uma área aproximada de 150 km<sup>2</sup>.

Figura 7 – Área de avaliação planimétrica do MDE SRTM



Fonte: Limite Estadual do Rio de Janeiro elaborado pelo IBGE

A área selecionada possui os elementos necessários para a avaliação planimétrica, pois a declividade nesta região é do tipo escarpado, e os dados de referência foi o mapeamento na escala de 1/25.000 elaborado pelo IBGE em 2007. É necessário também, selecionar outras áreas ao longo do território brasileiro com esta mesma característica para analisar se o comportamento dos dados se assemelham, independentemente da posição geográfica, o que não foi possível neste estudo por falta de dados.

Existem diversas formas de realizar uma avaliação da qualidade do MDE SRTM, por meio da estatística clássica, cálculo do T de Student, do Qui-Quadrado, do PEC, contudo, todas as avaliações altimétricas realizadas foram baseadas apenas no conceito do PEC.

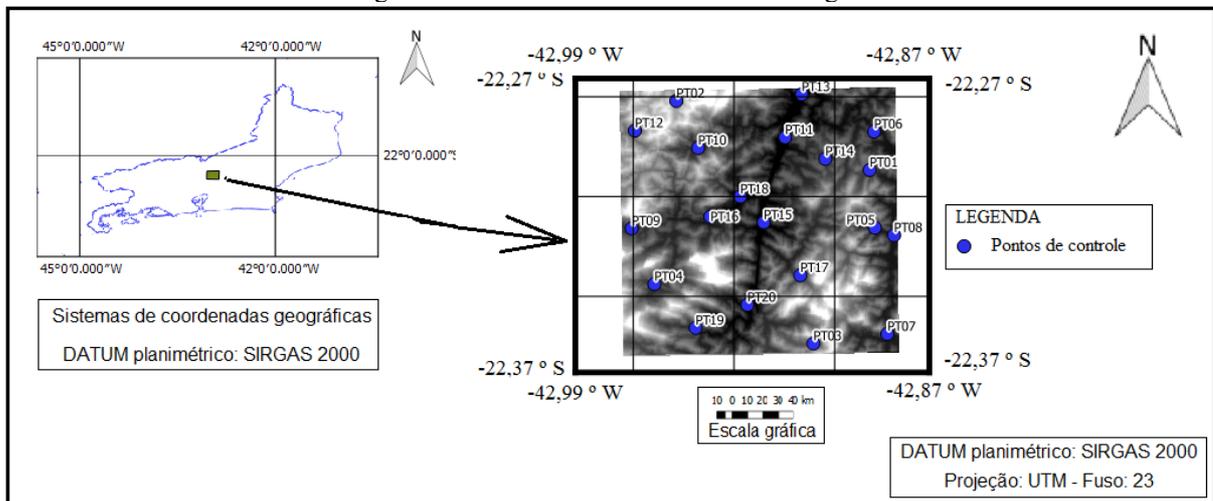
Vale ressaltar que na avaliação da componente planimétrica do MDE SRTM, foi necessário projetar o MDE SRTM em uma superfície plana, assim como o arquivo vetorial de drenagem (referência) cuja projeção selecionada foi a UTM.

Para a avaliação da componente planimétrica, utilizou-se o método adotado por Mozas et al. (2013), comparando feições lineares na avaliação posicional, o procedimento realizado nesta etapa do estudo, consistiu em num primeiro momento, extrair de forma automática o vetor da drenagem do MDE SRTM, para isso, gerou-se uma grade de direção do fluxo e determinou-se o fluxo acumulado para então definir um limiar de fluxo acumulado onde foram demarcados os canais de drenagem.

O passo seguinte foi identificar pontos homólogos entre este e o arquivo vetorial de referência (trecho de drenagem do mapeamento do Estado do Rio de Janeiro) elaborado pelo IBGE em 2007.

Seguindo recomendações de instituições internacionais como a NMAS (National Map Accuracy Standard) publicado em 1999 e disponível em <<https://pubs.usgs.gov/fs/1999/0171/report.pdf>>, da ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) publicado em 2013 e disponível em <[http://www.asprs.org/a/society/divisions/pad/Accuracy/Draft\\_ASPRS\\_Accuracy\\_Standards\\_for\\_Digital\\_Data\\_PE&RS.pdf](http://www.asprs.org/a/society/divisions/pad/Accuracy/Draft_ASPRS_Accuracy_Standards_for_Digital_Data_PE&RS.pdf)> e da NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy) publicado em 1998 e disponível em <<https://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards/projects/accuracy/party3/chapter3>>, foram escolhidos 20 pontos homólogos em uma área aproximada de 150 km<sup>2</sup>, conforme ilustrado na figura 8.

Figura 8 – Pontos fotoidentificáveis homólogos



Fonte: Mapa de limites estaduais elaborados pelo IBGE

Na sequência, gerou-se um arquivo vetorial do tipo ponto, cuja tabela denominada de “Valida\_Planimetria” possui os campos denominados de “E\_Referência”, “N\_Referência”, “E\_SRTM” e “N\_SRTM”.

Na sequência, foram obtidas as coordenadas planimétricas dos pontos homólogos, referentes as coordenadas planimétricas da drenagem extraída automaticamente do MDE SRTM e do arquivo de drenagem considerado como referência, conforme apresentado no apêndice A.

Assim, aplicando a equação 1, criou-se um novo campo nesta mesma tabela, que determina a distância entre a coordenada da drenagem do MDE SRTM e a coordenada do ponto homólogo do arquivo de drenagem de referência.

$$\Delta d_i = \sqrt{\Delta E_i^2 + \Delta N_i^2} \quad \text{Eq. 1}$$

sendo:

$$\Delta E_i = E_{imagem} - E_{referência}$$

$$\Delta N_i = N_{imagem} - N_{referência}$$

Após a obtenção dos valores das discrepâncias realizadas por meio da equação 1, passou-se à exclusão dos pontos considerados espúrios por meio da aplicação das equações 12 e 13, que se seguem:

$$O.I. < Q1 - 1,5 * (Q3 - Q1) \quad \text{Eq. 12}$$

$$O.S. > Q3 + 1,5 * (Q3 - Q1) \quad \text{Eq. 13}$$

onde O.I. representa o Outlier Inferior  
 onde O.S. representa o Outlier Superior  
 onde Q1 representa o 1º quartil  
 onde Q3 representa o 3º quartil

Após a exclusão dos dados espúrios, o passo seguinte foi aplicar o *script* desenvolvido pelo IBGE no software R para calcular o valor do EQM e determinar o valor do CE90, classificando, então, o PEC planimétrico do MDE SRTM.

Para classificar o PEC, o referido *script* realizou o seguinte procedimento: utilizando as distâncias resultantes da equação 1, calculou o EQM aplicando a equação 2, em seguida determinou o CE90 ordenando as distâncias resultantes da aplicação da equação 1 de forma crescente, o valor do CE90 é o 18º registro do apêndice A após seu ordenamento.

$$EQM_{Plan.} = \sqrt{\frac{(\sum \Delta E^2) + (\sum \Delta N^2)}{n-1}} \quad \text{Eq. 2}$$

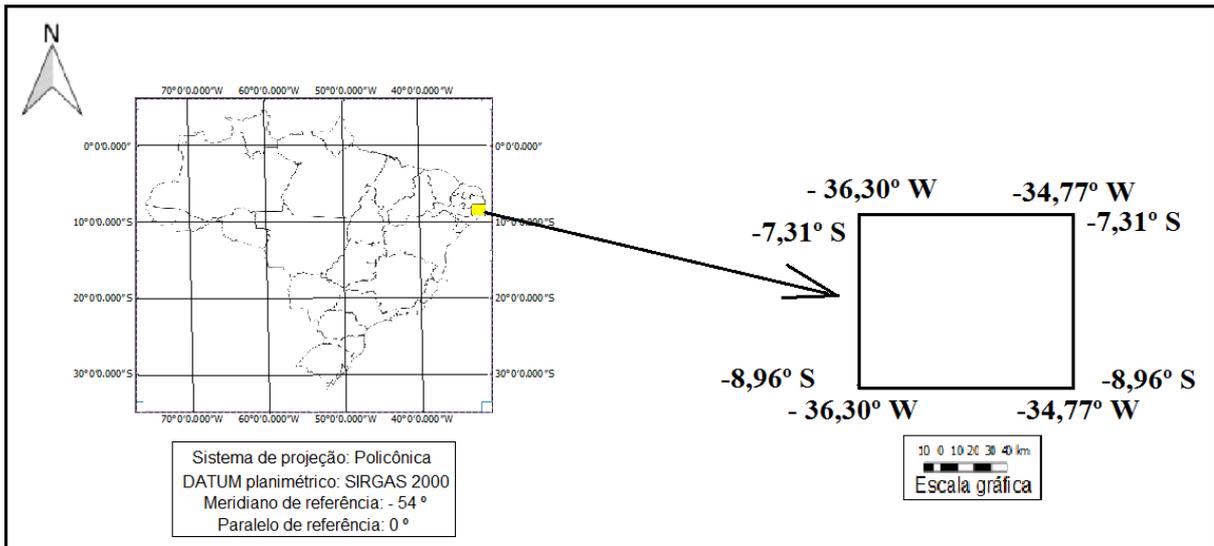
onde  $\Delta E$  é a diferença entre as coordenadas da componente E, e  $\Delta N$  é a diferença entre as coordenadas da componente N, e n é o número de pontos.

### 3.2.6 Avaliação da qualidade dos dados do satélite IceSat

A área selecionada neste estudo para a avaliação dos dados do satélite IceSat foi a parte leste do Estado de Pernambuco, esta área possui cerca de 30 mil km<sup>2</sup>, cuja declividade é classificada como sendo suave ondulado, entretanto, foi a única área onde se tem disponível um MDE de precisão, oriunda de perfilamento a laser com resolução de 1 metro para esta

avaliação. Será necessário fazer esta avaliação em outras áreas ao longo do território brasileiro, para identificar o comportamento destes dados em áreas com diferentes classes de declividade, o que não foi possível neste estudo por falta de dados, conforme ilustra a figura 9.

Figura 9 - Área selecionada para avaliação da exatidão dos dados do IceSat



Fonte: Limites Estaduais elaborados pelo IBGE

Como um dado utilizado para avaliar o MDE/MDS SRTM em todo o território brasileiro foi o IceSat, que por sua vez também é um MDS, o mesmo foi avaliado antes de ser tomado como referência, para tanto, o primeiro passo para esta avaliação, foi obter os dados IceSat e os dados LIDAR aerotransportado de referência.

Foram considerados 986 pontos altimétricos obtidos por meio de LIDAR como verdade de campo na avaliação do dado altimétrico do IceSat, ambos convertidos pelo IBGE para o Datum planimétrico (SIRGAS 2000) e altimétrico (MAPGeo 2015).

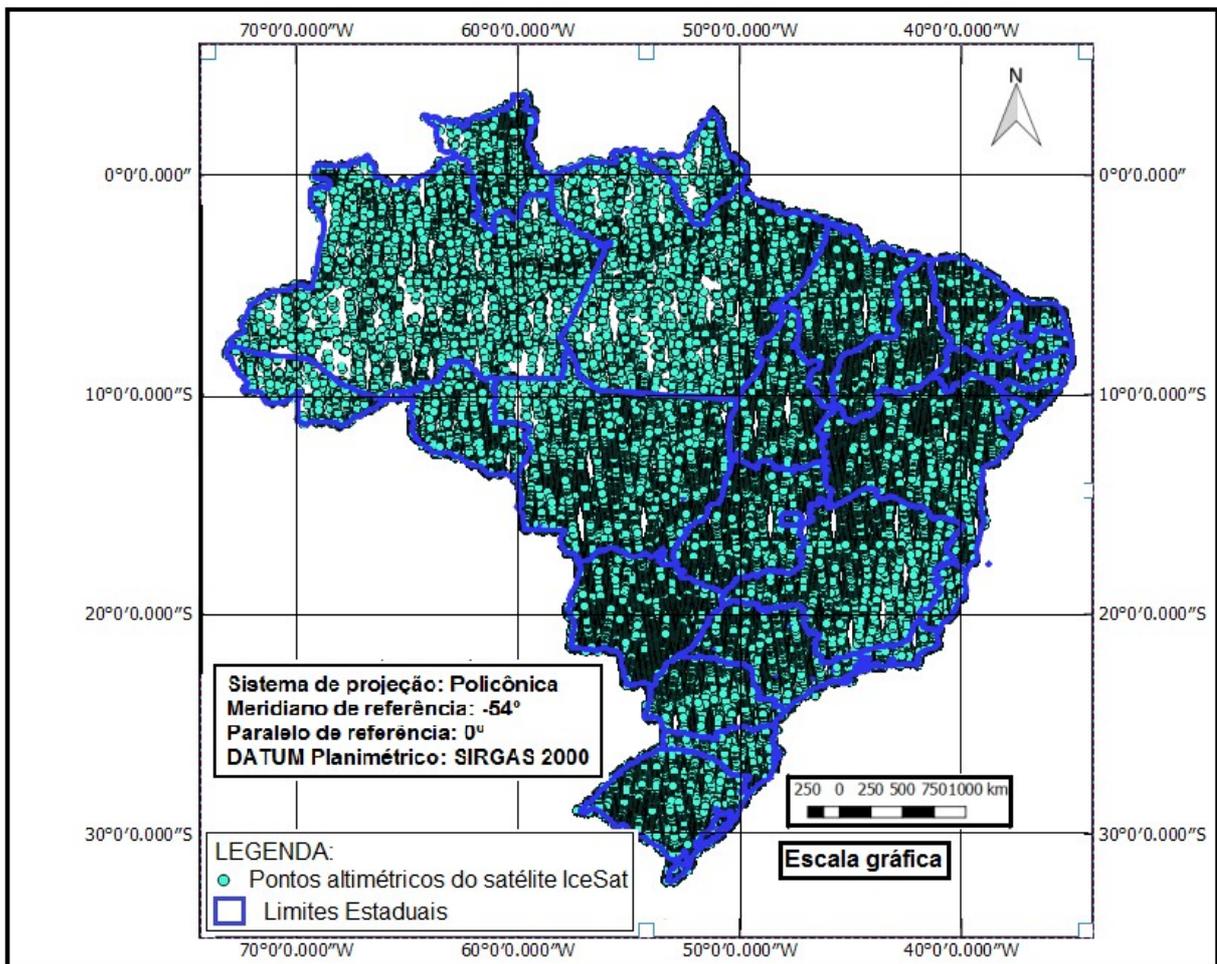
A avaliação dos dados IceSat, se deu a partir de um MDE de referência oriundo de perfilamento a laser. Foi gerado um arquivo vetorial do tipo ponto preenchendo automaticamente em uma coluna os registros de altitudes dos pontos IceSat e os registros de altitudes do MDE de referência, obtendo assim, as diferenças dos valores das altitudes dos pontos IceSat e LIDAR em suas respectivas posições geográficas.

Com os valores obtidos pela diferença das referidas colunas, determinou-se o erro máximo e o erro mínimo para o conjunto dos 986 pontos, bem como se calculou o valor do EQM altimétrico, seguido pela definição do valor do ZE90, assim obtendo a classificação do PEC do IceSat.

### 3.2.7 Avaliação da acurácia altimétrica do MDE SRTM tendo os pontos IceSat como referência (MDS)

O primeiro passo depois de validar os dados do IceSat, foi utilizá-lo para a avaliação do MDE SRTM em todo o território brasileiro, pois eles possuem uma cobertura completa para a área estudada, possuindo um total de 2.705.927 pontos com valores de altitude, distribuídos conforme ilustra a figura 10.

Figura 10 – Distribuição dos pontos altimétricos utilizados do satélite IceSat



Fonte: Mapa de limites estaduais elaborados pelo IBGE

Na sequência, gerou-se um arquivo vetorial do tipo ponto, contendo uma tabela com informações altimétricas oriundas do satélite IceSat em uma coluna e as informações das altitudes do MDE SRTM em outra coluna.

Em seguida, foi preenchida em uma nova coluna nesta mesma tabela com valores da diferença entre a altitude do IceSat e a altitude do MDE SRTM, obtendo assim, as discrepâncias pontuais do MDE SRTM ao longo de todo o território brasileiro.

A partir destas discrepâncias pontuais, foram interpolados todos os registros por meio da geoestatística, pelo método da krigagem, gerando um mapa com resolução de 5 km para todo o território brasileiro, denominado de “Mapa de Discrepâncias do MDE SRTM”. Este mapa foi classificado por cores em função das classificações do PEC.

Com o intuito de obter a classificação do PEC do MDE SRTM considerado como MDS por folha topográfica ao longo de todo o território brasileiro, selecionou-se os pontos IceSat de cada folha do mapeamento sistemático brasileiro na escala de 1/250.000 e obteve-se as diferenças entre as altitudes do MDE SRTM e as altitudes dos pontos IceSat nas mesmas posições geográficas, e a partir dessas diferenças foi calculado o valor do EQM e determinado o valor do ZE90, que permitiu classificar o PEC do MDE SRTM tendo como verdade de campo, os pontos IceSat. Esse resultado representa a qualidade do MDE SRTM considerado como MDS.

### **3.2.8 Definição e seleção de amostras para avaliação da qualidade do MDE SRTM tendo como referência os pontos PPP (MDT) e IceSat (MDS)**

Com o objetivo de obter uma relação entre a qualidade do MDE SRTM, tendo dados sobre a superfície como referência, e a qualidade do MDE SRTM, tendo dados sobre o terreno como referência, o presente estudo dividiu o Brasil em quadrículas para que, com um processo de amostragem, fosse comparado em cada amostra o PEC do MDE SRTM tendo o dado IceSat (MDS) como referência e tendo o dado PPP (MDT) como referência.

Optou-se para este estudo, utilizar o tamanho da célula (GRID), conforme padrão do mapeamento sistemático brasileiro, dividindo o Brasil em grade, onde cada célula não fosse inferior ao tamanho mínimo de 10x10 cm na escala da carta, recomendado pelo IBGE no documento publicado com o título “Avaliação da qualidade de dados geoespaciais”, IBGE (2017).

Das articulações do mapeamento sistemático, somente a folha de 1/250.000 atendeu o critério de cobertura de todo o território brasileiro o mínimo de 30 pontos com distância de aproximadamente 5 km entre si, de acordo com IBGE (2010), sendo esta a razão da utilização deste dado para a análise proposta.

O Brasil foi dividido em 559 folhas (lotes) de  $1,5^\circ \times 1^\circ$ , compatível com a escala de 1/250.000.

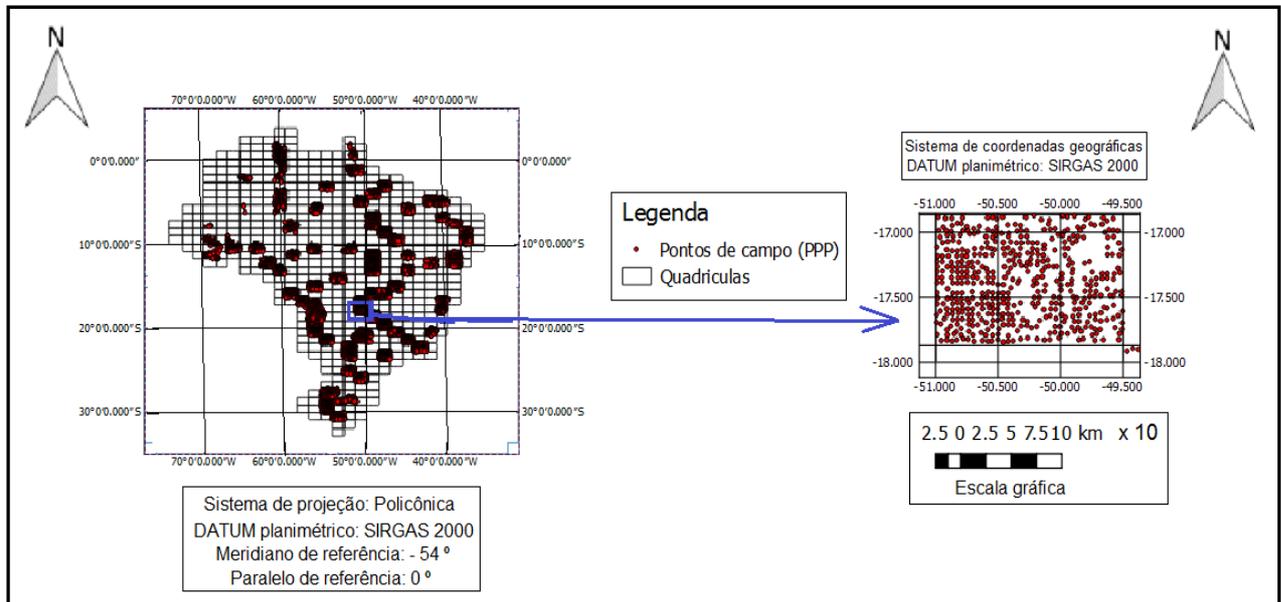
Esta informação é necessária para o acompanhamento do quadro 4, que em seu nível II de Inspeção, que é o recomendado pelas instituições oficiais produtoras de cartografia no Brasil (IBGE e DSG), dispõe que para atingir o Padrão NQA em que o lote seja de 501 a 1200 folhas, é necessária uma amostra de 80 folhas, conforme letra código J do referido quadro.

Finalmente, uma vez identificado o tamanho do lote (folhas topográficas de escala 1/250.000 existentes no Brasil) que é 559, e o tamanho da amostra (folhas a serem validadas) que é 80, calculou-se o intervalo entre as amostras dividindo o tamanho do lote (559) pelo tamanho da amostra (80), obtendo assim o espaçamento entre as amostras (7).

Assim, foram selecionadas amostras por meio do método da amostragem sistemática, onde a primeira foi selecionada aleatoriamente e as demais com intervalo de 7 folhas.

Foram selecionados pontos de controle para cada amostra, oriundo de medição por sistema de posicionamento por satélite (PPP), tendo sido utilizados cerca de 300 pontos para cada amostra, de acordo com a figura 11.

Figura 11 – Distribuição dos pontos de campo utilizados (PPP)



Fonte: Articulação das folhas de 1/250.000 elaborado pelo IBGE

### 3.2.9 Avaliação da acurácia altimétrica do MDE SRTM tendo os pontos PPP como referência (MDT)

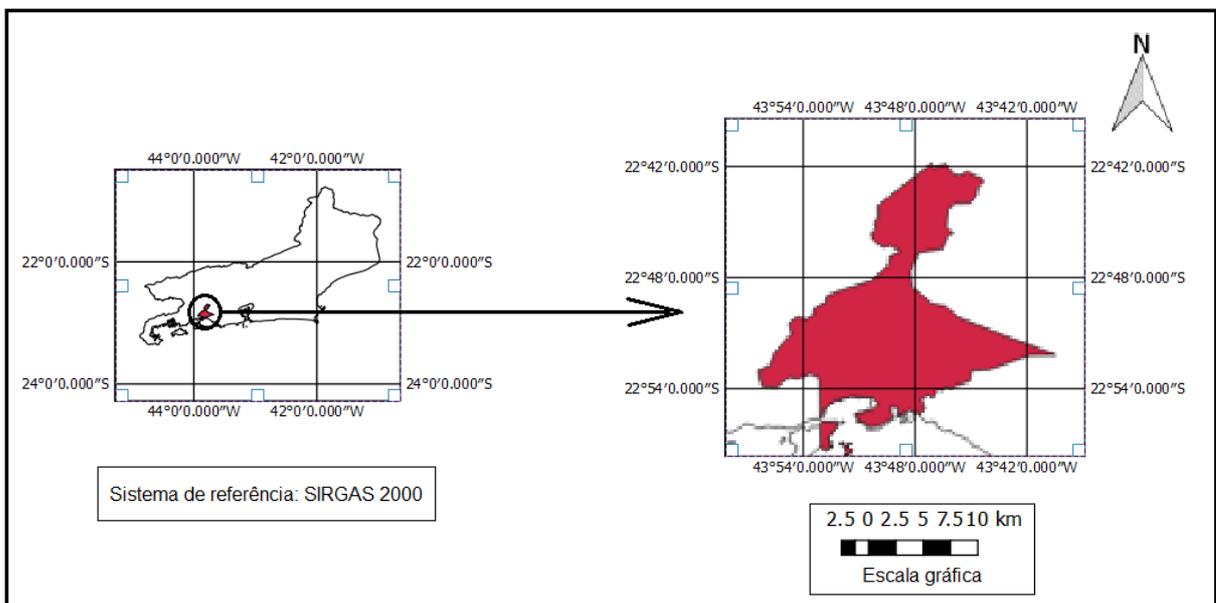
A partir do arquivo vetorial de pontos PPP de cada amostra, obteve-se as diferenças entre as altitudes do MDE SRTM e as altitudes dos pontos PPP nas mesmas posições geográficas, e a partir dessas diferenças foi calculado o valor do EQM e determinado o valor do ZE90, que permitiu classificar o PEC do MDE SRTM tendo como verdade de campo, os pontos de controle (PPP). Esse resultado representa a qualidade do MDE SRTM considerado como MDT.

Após a classificação dos respectivos PECs, elaborou-se um quadro comparativo entre os resultados obtidos da qualidade do MDE SRTM como MDS com os resultados obtidos da qualidade do mesmo como MDT, para todas as 80 amostras (folhas topográficas na escala de 1/250.000).

### 3.2.10 Identificação e seleção de áreas e dos dados necessários para avaliação no processo de ortorretificação

A área selecionada para esta avaliação, foi o município de Itaguaí, localizado no Estado do Rio de Janeiro, cuja declividade é classificada como sendo do tipo suave ondulado, contemplando uma área de pouco mais de 275 km<sup>2</sup>. A figura 12 ilustra a localização da área.

Figura 12 – Localização do município de Itaguaí no Estado do Rio de Janeiro



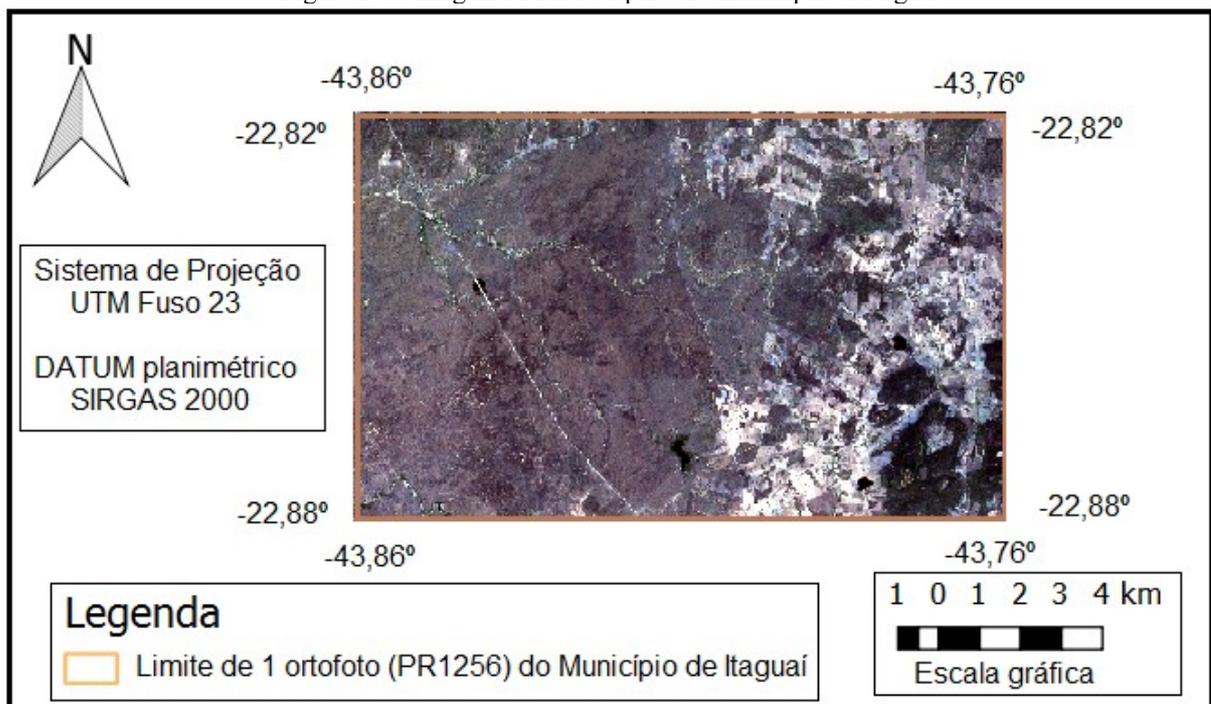
Fonte: Limite Estadual do Rio de Janeiro e dos respectivos municípios elaborados pelo IBGE

A seleção desta área ocorreu em função da disponibilidade dos dados necessários no procedimento de ortorretificação, apesar de a recomendação para se realizar este tipo de avaliação ser em terrenos com relevo movimentado, pois são nessas áreas em que ocorrem as maiores distorções no processo de ortorretificação, independentemente da qualidade do MDE utilizado neste processo, conforme é mencionado nos estudos de Araújo et al. (2007), Maranhão et al. (2011), e Pinto & Amorim (2011).

Após a seleção da área, foram selecionados os pontos PPP disponíveis, imagens (PRISM) não ortorretificadas, as efemérides do satélite e os MDEs. Os MDEs selecionados para esta avaliação foram os SRTM30, SRTM90, ALOS/PALSAR e fotogramétrico.

A figura 13 ilustra uma imagem PRISM no município de Itaguaí, e as figuras 13a, b, c, d mostram a distribuição dos pontos de controle utilizados para a geração da mesma.

Figura 13 – Imagem PRISM de parte do município de Itaguaí



Fonte: Elaborado pelo autor

Figuras 13a, b, c, d – Distribuição dos pontos de controle utilizados na geração das ortoimagens



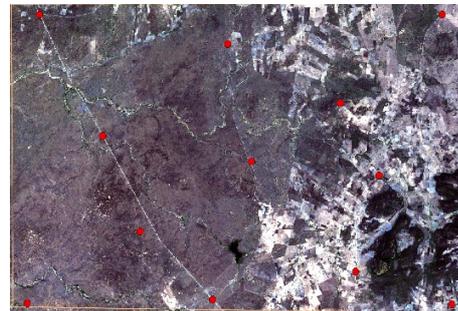
a) 6 pontos de controle



b) 7 pontos de controle



c) 9 pontos de controle



d) 12 pontos de controle

Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.2.11 Aplicação dos processos de ortorretificação para geração de diversas qualidades de ortoimagens

Para definir a real aplicabilidade do uso do MDE SRTM num processo de geração de ortofotos, é necessário ter os seguintes dados:

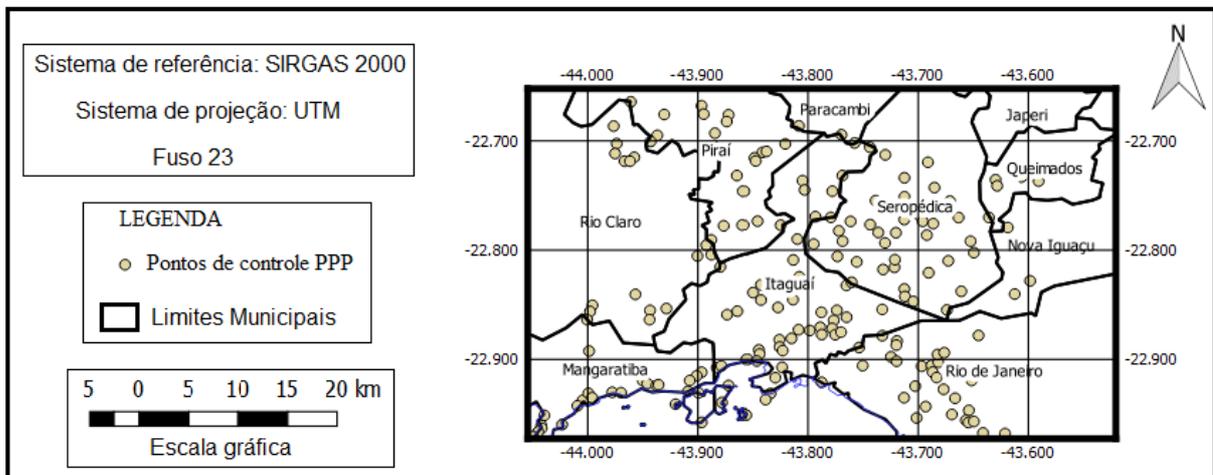
1. imagem não ortorretificada;
2. efemérides do satélite no instante da obtenção da imagem para correções das distorções da geometria do satélite e/ou certificado de calibração da câmera, dados de  $\omega$ ,  $\kappa$  e  $\varphi$ , que são movimentos da aeronave no instante da tomada da foto, além das coordenadas x, y e z da aeronave;
3. MDE SRTM e pontos de controle de campo bem identificados na imagem e no campo.

O primeiro passo foi ortorretificar uma imagem PRISM com o uso do MDE SRTM90, gerando 4 ortofotos, uma para cada conjunto de pontos de controle, onde foram utilizados 4 conjuntos de pontos neste processo (6, 7, 9 e 12 pontos PPP).

O segundo passo, foi gerar outras novas 4 ortofotos em função do número de pontos de controle, apenas substituindo o MDE SRTM de 90 metros pelo de 30 metros para cada conjunto de pontos, na sequência, o terceiro passo foi realizar o mesmo procedimento do segundo passo, porém, substituindo o MDE SRTM de 30 metros pelo MDE ALOS/PALSAR de 12,5 metros de resolução, no quarto e último passo, foram geradas outras 4 ortofotos, substituindo o MDE ALOS/PALSAR pelo MDE obtido no processo fotogramétrico por aerotriangulação compatível com a escala de 1/10.000, oriundo do mapeamento do município de Itaguaí-RJ, totalizando 16 ortofotos geradas.

Depois de gerar as 16 ortofotos variando os MDEs (SRTM de 90 m, SRTM de 30 m, ALOS/PALSAR e Fotogramétrico) e a quantidade de número de pontos de controle (6, 7, 9, e 12 pontos), foi feita uma avaliação da qualidade posicional das mesmas, a partir de 147 pontos de controle, cuja distribuição é ilustrada na figura 14, seguindo o mesmo procedimento adotado na avaliação posicional do MDE SRTM, ou seja, calculando o EQM e determinando o CE90, bem como classificando o PEC planimétrico das ortoimagens geradas.

Figura 14, Pontos de controle utilizados na avaliação das ortoimagens em Itaguaí



Fonte: Limites municipais elaborados pelo IBGE

As ortoimagens foram geradas a partir da ortorretificação das imagens com pontos de controle (6, 7,9 e 12) distribuídos ao longo da mesma.

### 3.2.12 Análise da potencialidade do uso do MDE SRTM no processo de ortorretificação

Após a geração das ortoimagens, foi elaborado um quadro comparativo com a indicação da classificação do PEC de cada ortoimagem obtida, onde foi possível avaliar a potencialidade do uso do MDE SRTM no processo de ortorretificação, associando o resultado

obtido nesta etapa com os resultados obtidos na avaliação da qualidade altimétrica do MDE SRTM, além de identificar o número ideal de pontos de controle, bem como a melhor distribuição dos mesmos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE DO PEC DOS MDEs GLOBAIS POR CLASSE DE DECLIVIDADE

O quadro 6 apresenta os valores do EQM e ZE90, nas diversas classes de declividade, para os MDEs com 30 m e 90 m de resolução espacial do SRTM e com 12,5 m do ALOS/PALSAR.

Quadro 6 – Comparação do EQM e ZE90 nos diversos tipos de declividade, utilizando os MDEs 30 e 90 do SRTM e o MDE ALOS/PALSAR.

EQM	Plano	Suave_Ondulado	Ondulado	Forte_Ondulado	Montanhoso	Escarpado
SRTM90	6,1	11,67	16,74	18,42	22,29	35,05
SRTM30	4,78	4,99	5,27	6,18	8,22	14,18
ALOS 12,5	4,53	4,67	5,29	6,43	7,94	14,16

ZE 90	Plano	Suave_Ondulado	Ondulado	Forte_Ondulado	Montanhoso	Escarpado
SRTM90	8,99	20,41	27,91	34	36,76	60
SRTM30	7,7	8,82	9,34	10,81	11,72	15
ALOS 12,5	7,73	8,36	9,21	10,03	11,32	14,34

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos resultados apresentados no quadro 6, gerou-se as figuras 15 e 16.

Figura 15 – Variação do valor do ZE90 em metros, quanto ao MDE analisado em suas diversas configurações de declividade

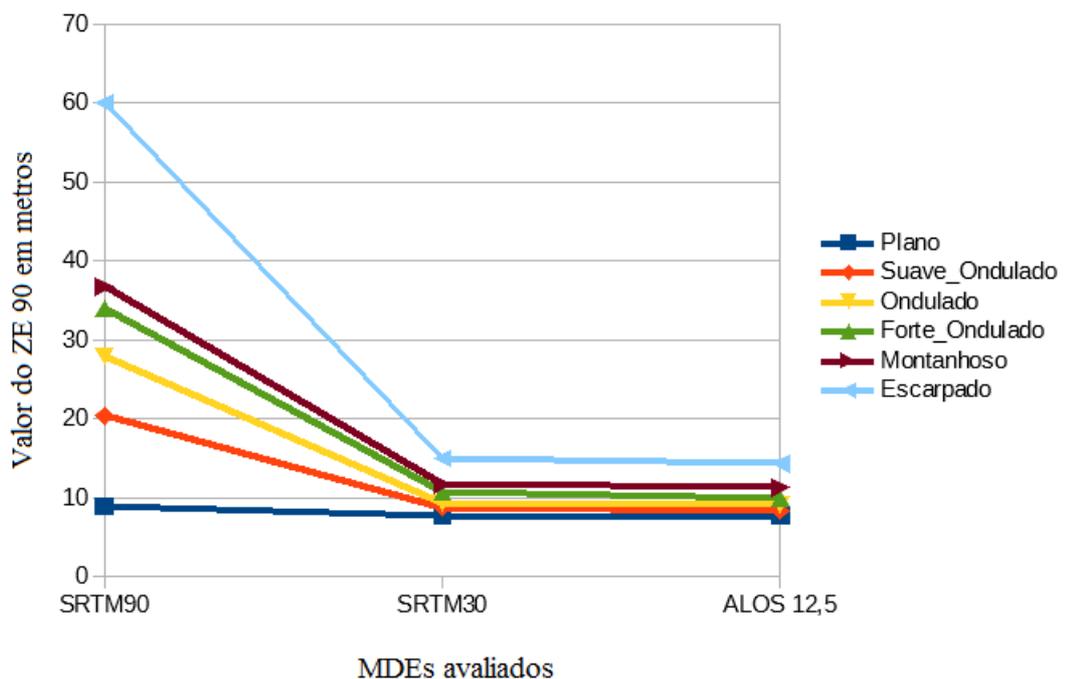
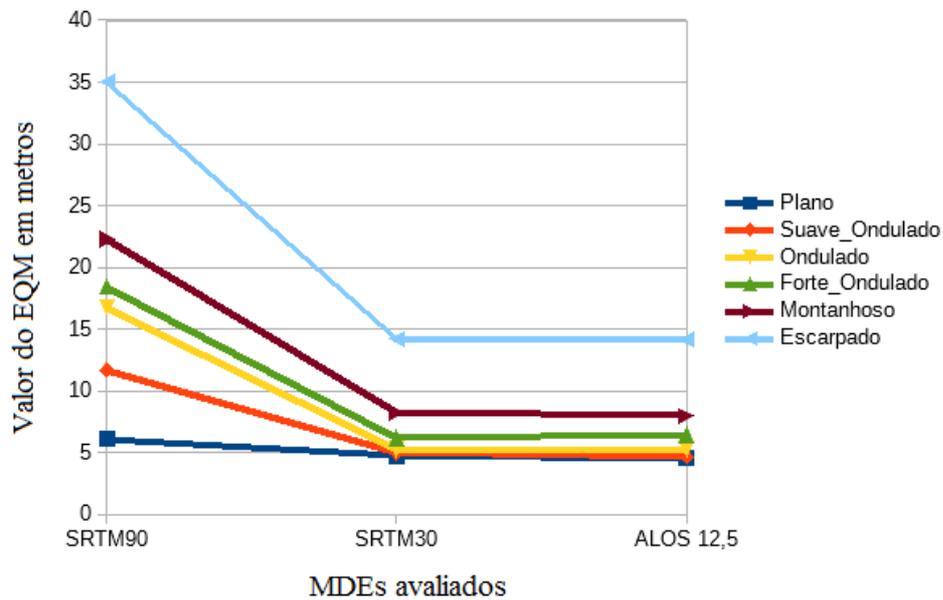


Figura 16 – Variação do valor do EQM em metros, quanto ao MDE analisado em suas diversas configurações de declividade



Fontes: Elaborados pelo autor

As figuras 15 e 16 apresentam entre o MDE de 90 m e 30 m de resolução espacial do SRTM linhas não paralelas, demonstrando que as diferenças dos valores do EQM e ZE90 entre os respectivos MDEs vão aumentando conforme o relevo se torna mais íngreme.

Apresentam também que as linhas são quase paralelas entre o MDE de 30 m de resolução do SRTM e o MDE de 12,5 m do ALOS/PALSAR, independentemente da classe de declividade do relevo, ilustrando que as diferenças dos valores do EQM e do ZE90 são pequenas, na casa dos centímetros.

É notável nas figuras 15 e 16 que, para a classe de declividade plana, a linha é quase uma reta desde o MDE de 90 m de resolução do SRTM até o MDE de 12,5 m do ALOS/PALSAR, variando pouco mais de 1 metro, o que não ocorreu nas demais classes, indicando que o primeiro MDE tem quase a mesma qualidade do segundo para áreas planas. Este resultado justifica-se pelo fato de que, havendo pouca ou nenhuma variação do relevo, a média da altitude no pixel de 90 metros é semelhante a média da altitude do pixel de 30 metros.

Uma razão provável para os resultados do EQM e do ZE90 entre o MDE de 30 m de resolução do SRTM e o MDE de 12,5 m do ALOS/PALSAR serem muito próximos, se dá em função de que os pontos de controle foram obtidos em sua grande maioria em solo exposto, sendo assim, a banda da onda utilizada pelo sensor não interferiu no resultado, pois não há vegetação no local da avaliação.

Ainda analisando-se o tamanho do *pixel*, o quadro 6 e as figuras 15 e 16, indicam que o MDE ALOS/PALSAR com *pixel* de 12,5 metros não teve melhora considerável em nenhuma classe de declividade, quando comparado aos valores do EQM e do ZE90 deste com o MDE SRTM de 30 metros, esse resultado indica que com a interpolação do MDE de 30 metros de resolução para 12,5 metros não se obtém melhoras na mesma proporção na qualidade do modelo.

Rao (2004) afirma ter encontrado erros menores que 5 metros na componente vertical do MDE SRTM, o que o resultado apresentado no quadro 6 confirma, porém, no estudo de Rao (2004) não há informação acerca da classe de declividade, todavia, esse valor, de acordo com o quadro 6, só é possível em terrenos com classes de declividades plana e suave ondulado.

Observe-se que para os relevos mais íngremes, não foi possível encontrar erros menores que 5 metros, levando a crer que é possível que a diferença encontrada entre este estudo e o estudo de Rao (2004), seja em função de que o MDE SRTM avaliado por Rao (2004) ter sido o MDE SRTM de 90 metros.

A precisão estimada *a priori* pela NASA para o MDE do SRTM é de 16 metros em 90% dos dados, conforme afirma Rabus et al. (2003), e o quadro 6 apresentado neste estudo confirma esse valor para o MDE SRTM de 1" de arco, no entanto, para o MDE de 3" de arco, somente na área plana foi possível alcançar esse valor.

Estes resultados confirmam os obtidos nos estudos de Elkhracht et al. (2017) quando afirmaram que a qualidade do MDE SRTM é bem superior ao estimado pela NASA, pois neste estudo, até mesmo na área com declividade classificada como escarpado, a acurácia do MDE SRTM ficou abaixo de 16 m.

O quadro 7 apresenta, além dos valores do EQM e do ZE90 já apresentados no quadro 6, a classificação do PEC convencional e digital, nas diversas classes de declividade:

Quadro 7 – Classificação do PEC do MDE SRTM em diversas classes de declividade

SRTM	Plano	Suave Ondulado	Ondulado	Forte Ondulado	Montanhoso	Escarpado
EQM	4,78	4,99	5,27	6,18	8,22	14,18
ZE 90	7,7	8,82	9,34	10,81	11,72	15
PEC	50A	50A	50A	50B	50C	<u>100B</u>
PEC Digital	50B	50B	50B	50C	50D	<u>100C</u>

Fonte: Elaborado pelo autor

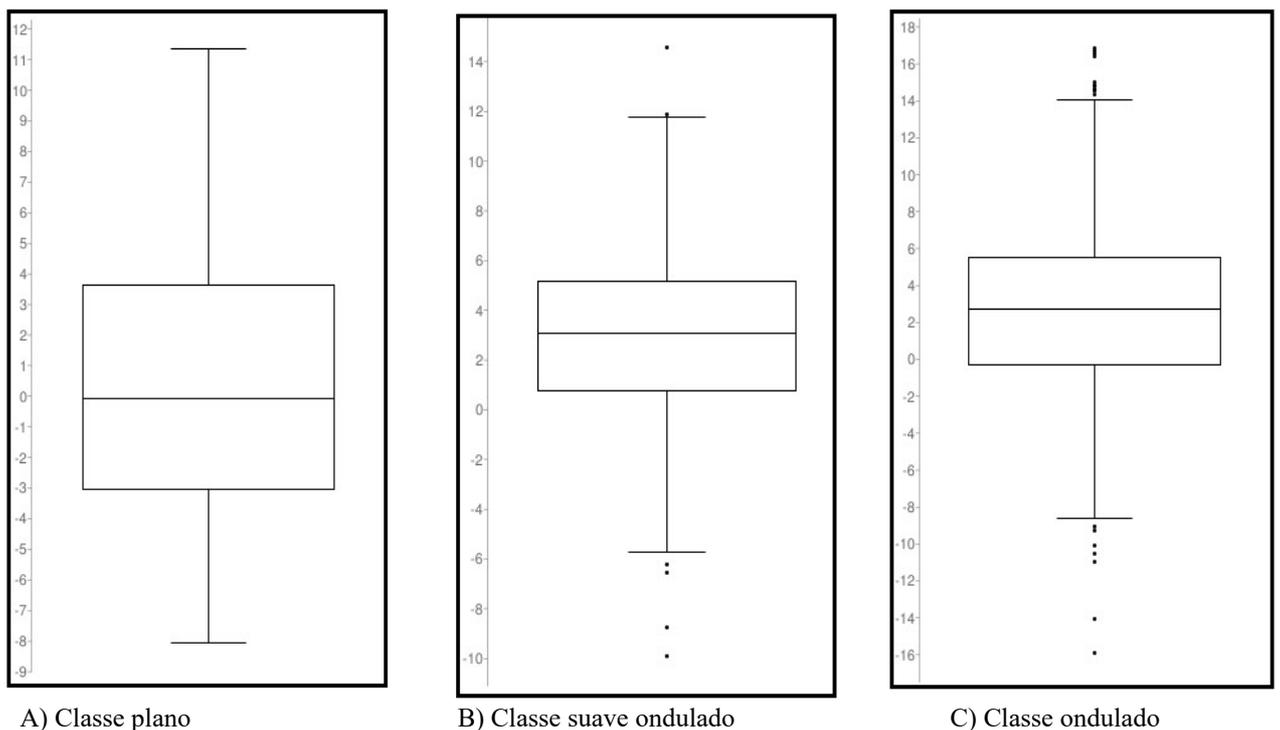
Os resultados apresentados no quadro 7 corroboram com os estudos de Mozas et al. (2013), que concluíram que a classificação do PEC do MDE degrada conforme o relevo se torna mais íngreme.

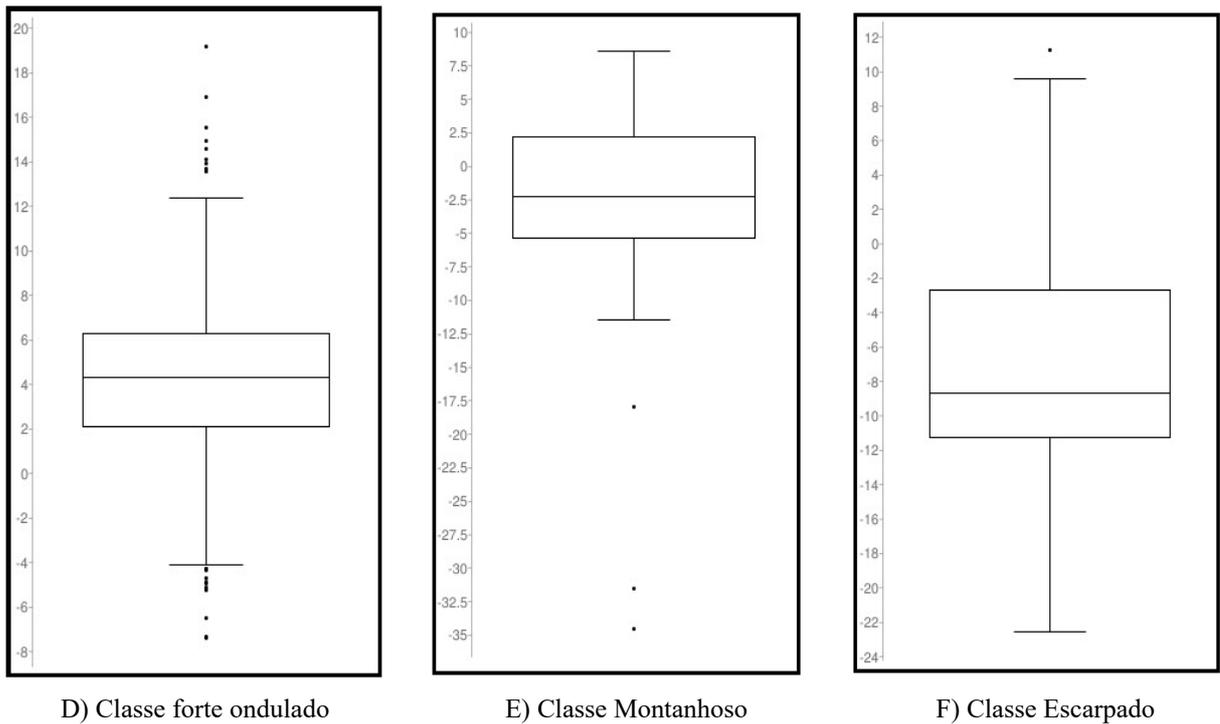
Levando em consideração o resultado apresentado no quadro 7, percebe-se que a única classe de declividade, onde o MDE SRTM não é compatível com o PEC para a escala de 1/50.000, é a classe escarpado.

Os resultados deste estudo, contradizem as colocações de Gaboardi et al. (2005) que afirmam que o MDE SRTM é compatível com a escala 1/100.000 em áreas planas. Entretanto, as metodologias utilizadas divergem entre ambos os estudos, pois os dados analisados por Gaboardi et al. (2005) foram feitos com base no MDE SRTM de 90 metros de resolução e com pontos de controle abrangendo a região norte do Brasil, contemplando uma amplitude topográfica de 200 metros, variando de 0 até 200 metros de altitude, e o presente estudo analisou uma área plana com o MDE SRTM de 30 metros situada na região centro-oeste com amplitude topográfica de 65 metros, variando de 85 a 150 metros de altitude, região onde não há uma cobertura vegetal de forma semelhante a existente na região norte do Brasil, por isso o resultado deste estudo obteve um resultado melhor, compatível com a escala de 1/50.000.

As figuras 17a até 17f representam o box plot dos dados utilizados na avaliação do PEC separadamente por classes de declividade.

Figuras 17a, b, c, d, e, f – Box plot em diferentes classes de declividade (medidas em metros)





Fonte: Elaborado pelo autor

É possível afirmar a partir das figuras 17a até a 17f que as discrepâncias apresentadas no 1º e 3º quartis vão aumentando conforme o relevo se torna mais íngreme, da mesma forma, a presença de dados identificados como outliers.

#### 4.1.1 Análise da conversão do EGM 96 para o MapGeo 2015

O quadro 8 ilustra os valores máximo e mínimo, para cada classe de declividade, das discrepâncias encontradas entre as altitudes do MDE SRTM sem a conversão do EGM 96 para o MAPGeo 2015, e as altitudes do MDE SRTM com a referida conversão.

Quadro 8 - Discrepâncias máximas e mínimas entre a superfície equipotencial EGM 96 comparado com a superfície equipotencial oficial do Brasil, o MAPGeo 2015

Discrepâncias	Plano	Suave Ondulado	Ondulado	Forte Ondulado	Montanhoso	Escarpado
Menor valor	-1,97m	-1,05m	-0,11m	0,31m	-0,57m	-1,7m
Maior valor	1,78m	0,45m	0,82m	1,69m	0,76m	0,56m

Fonte: Elaborado pelo autor

Note-se pelo quadro 8 que o tipo de relevo não tem uma relação direta no resultado da referida conversão, esta discrepância pode estar associada a erros aleatórios existentes tanto no EGM 96 como no MAPGeo 2015 e que a análise não faz parte dos objetivos deste estudo.

Os maiores valores de discrepâncias para as áreas avaliadas neste estudo foram apresentadas na área plana, contudo, isso não significa que o mesmo resultado se repetirá em outras áreas, pois estas discrepâncias estão associadas diretamente com a qualidade dos modelos avaliados (EGM 96 e MAPGeo 2015), onde a qualidade do modelo depende diretamente dos dados utilizados nas elaborações dos mesmos.

O quadro 9 ilustra o valor do EQM dos MDE SRTM de 1" de arco e de 3" de arco, em diversas classes de declividade, nas duas superfícies equipotenciais (EGM 96 e MAPGeo 2015).

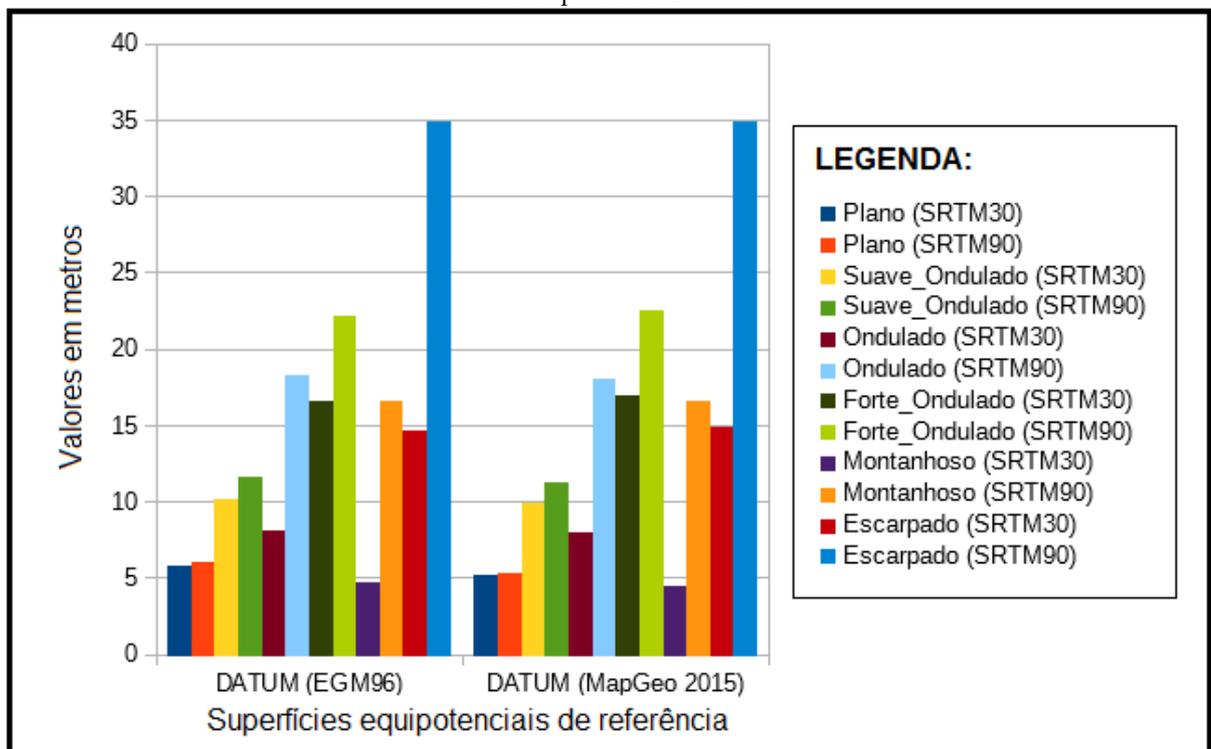
Quadro 9 – Valores em metros do EQM nas superfícies equipotenciais do EGM 96 e no MAPGeo 2015, em diversos tipos de declividade.

EQM	Plano (SRTM30)	Plano (SRTM90)	Suave_Ondulado (SRTM30)	Suave_Ondulado (SRTM90)	Ondulado (SRTM30)	Ondulado (SRTM90)
DATUM (EGM96)	4,78	6,1	4,99	11,67	5,27	16,74
DATUM (MapGeo 2015)	4,58	5,4	4,88	11,42	4,98	16,03
EQM	Forte_Ondulado (SRTM30)	Forte_Ondulado (SRTM90)	Montanhoso (SRTM30)	Montanhoso (SRTM90)	Escarpado (SRTM30)	Escarpado (SRTM90)
DATUM (EGM96)	6,18	18,42	8,22	22,29	14,18	35,05
DATUM (MapGeo 2015)	5,67	18,02	7,59	21,93	14,01	34,36

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos resultados apresentados no quadro 9, gerou-se a figura 18.

Figura 18 - Comportamento do EQM, nas superfícies equipotenciais do EGM 96 e no MAPGeo 2015, em diversos tipos de declividade.



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 18, indica que o valor do EQM, apesar de haver diferenças entre as duas superfícies equipotenciais, tende a ser constante, variando poucos centímetros, conforme indicado no quadro 9, independe da classe de declividade, indicando que dependendo da escala do produto cartográfico, a conversão do EGM 96 para o MAPGeo 2015 é desnecessária, independente da classe de declividade.

O quadro 10 mostra os valores do ZE90 dos MDE SRTM de 1" de arco e de 3" de arco, em diversas classes de declividade nas duas superfícies equipotenciais (EGM 96 e MAPGeo 2015).

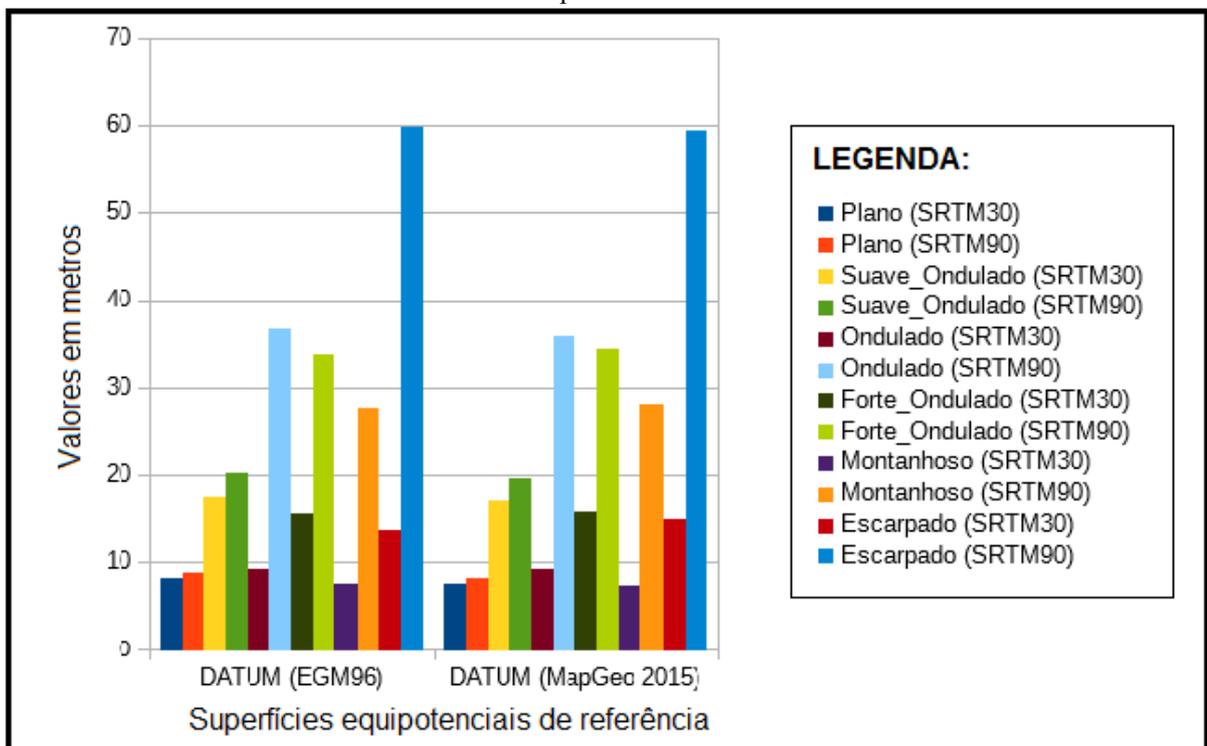
Quadro 10 – Valores em metros do ZE90 nas superfícies equipotenciais do EGM 96 e no MAPGeo 2015, em diversos tipos de declividade.

ZE 90	Plano (SRTM30)	Plano (SRTM90)	Suave_Ondulado (SRTM30)	Suave_Ondulado (SRTM90)	Ondulado (SRTM30)	Ondulado (SRTM90)
DATUM (EGM96)	7,7	8,99	8,82	20,41	9,34	27,91
DATUM (MapGeo 2015)	7,58	8,29	8,56	19,72	9,31	27,33
	Forte_Ondulado (SRTM30)	Forte_Ondulado (SRTM90)	Montanhoso (SRTM30)	Montanhoso (SRTM90)	Escarpado (SRTM30)	Escarpado (SRTM90)
DATUM (EGM96)	10,81	34	11,72	36,76	15	60
DATUM (MapGeo 2015)	10,32	33,68	11,23	36,26	14,63	59,44

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nos resultados do quadro 10, gerou-se a figura 19.

Figura 19 - Comportamento do ZE90 nas superfícies equipotenciais do EGM 96 e no MAPGeo 2015, em diversos tipos de declividade.



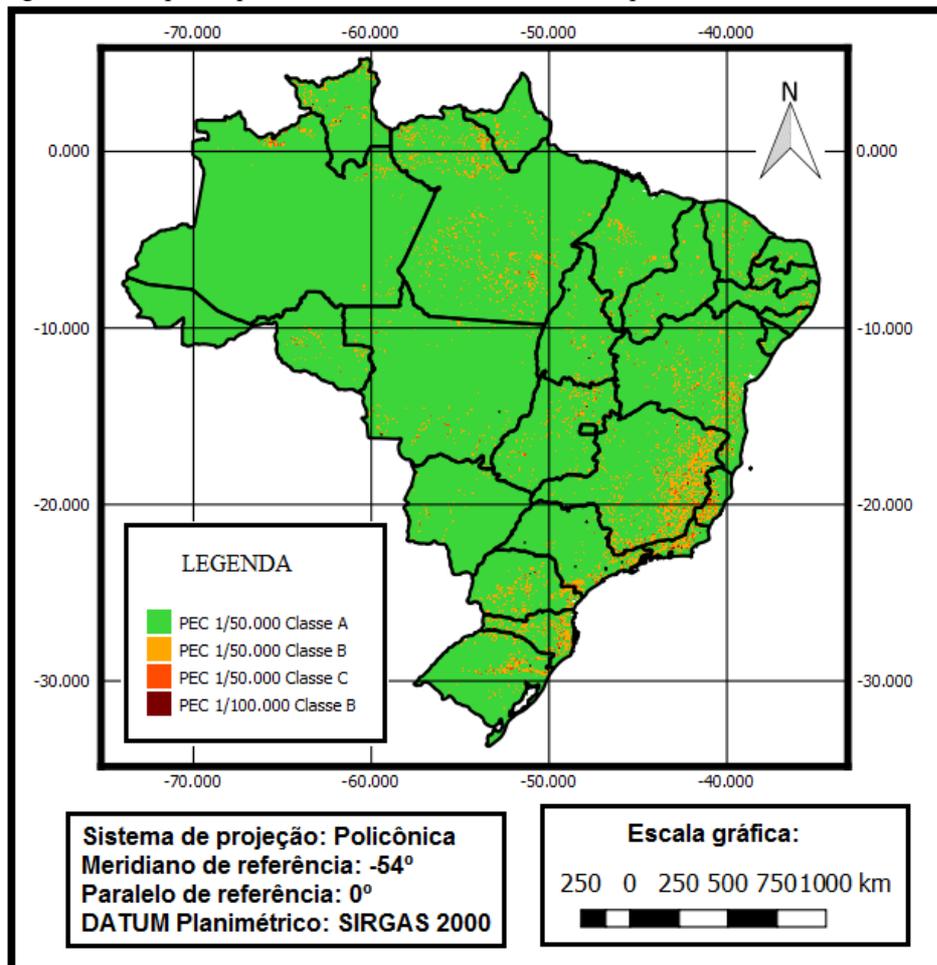
Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados obtidos da análise do ZE90 se assemelharam aos obtidos do EQM, indicando que para trabalhos do mapeamento sistemático brasileiro em escala média ou pequena, ou seja, 1/50.000 ou menores, é desnecessário a conversão da superfície EGM 96 para o MAPGeo 2015, tendo em vista que as diferenças dos valores do EQM e ZE90 entre as referidas superfícies ficam abaixo de 1 metro em mais de 90% dos pontos avaliados.

#### 4.2 MAPA DE QUALIDADE DO MDE SRTM PARA TODO O TERRITÓRIO BRASILEIRO COM BASE NA DECLIVIDADE

Tendo como base o mapa de declividade oficial do Brasil, foram substituídos os atributos presentes no referido mapa, as classes de declividade pelas respectivas classes do PEC apresentados no quadro 7, gerando o mapa de qualidade do MDE SRTM, para todo o território brasileiro, conforme ilustra a figura 20.

Figura 20 – Mapa da qualidade do MDE SRTM, baseado apenas na declividade do relevo



Fonte: Limites Estaduais fornecidos pelo IBGE e mapa de declividade do Brasil fornecido pela CPRM  
 modificado pelo autor

Da análise da figura 20, pode-se observar que a região sudeste é a região onde se concentra a maior parte das áreas com declividade mais íngremes, seguida da região sul, onde, após quantificar a presença de cada classe de declividade em cada região do Brasil, foi possível gerar o quadro 11.

Quadro 11 – Porcentagem da presença das classes de declividade por região

Classes de declividade	Região Sul	Região Sudeste	Região Centro-Oeste	Região Nordeste	Região Norte	BRASIL
Plano	23,88%	20,29%	50,88%	45,94%	49,02%	43,73%
Suave Ondulado	34,58%	33,02%	36,61%	33,21%	34,06%	34,31%
Ondulado	29,53%	28,90%	10,02%	15,13%	13,30%	15,93%
Forte Ondulado	11,28%	15,84%	2,29%	5,28%	3,38%	5,49%
Montanhoso	1,14%	1,78%	0,19%	0,41%	0,22%	0,5%
Escarpado	0,08%	0,16%	0,01%	0,02%	0,01%	0,04%

Fonte: Elaborado pelo autor

O quadro 11 apresenta valores em percentuais, indicando para cada região, a presença das classes de declividade, ademais, associando os resultados deste quadro com os resultados do quadro 7, foi possível gerar o quadro 12, que mostra a classificação do PEC do MDE SRTM para cada região do Brasil.

Quadro 12 – Qualidade do MDE SRTM separada por região

Região	PEC Analógico	LE90
SUL	1/50.000 (PEC-A)	87,49%
	1/50.000 (PEC-B)	98,77%
SUDESTE	1/50.000 (PEC-A)	82,21%
	1/50.000 (PEC-B)	98,05%
CENTRO-OESTE	1/25.000 (PEC-C)	0,00%
	1/50.000 (PEC-A)	97,51%
NORDESTE	1/25.000 (PEC-C)	0,00%
	1/50.000 (PEC-A)	94,28%
NORTE	1/25.000 (PEC-C)	0,00%
	1/50.000 (PEC-A)	96,38%
BRASIL	1/25.000 (PEC C)	0,00%
	1/50.000 (PEC A)	93,97%

Fonte: Elaborado pelo autor



Montanhoso	EQM	8,22m	8,03m	8,02m	7,35m	7,43m	8,05m
	LE90	11,72m	10,89m	11,01m	10,15m	10,53m	11,05m
	PEC Analógico	50-C	50-C	50-C	50-B	50-B	50-C
Escarpado	EQM	14,18m	13,67m	13,62m	12,77m	12,88m	13,50m
	LE90	15,00m	13,44m	13,57m	11,24m	12,53m	13,33m
	PEC Analógico	100-B	100-B	100-B	100-A	100-A	100-B

Fonte: Elaborado pelo autor

O quadro 13 apresenta que os valores do EQM e ZE90 são menores em áreas menos íngreme tanto para o MDE SRTM original quanto para os MDEs derivados dele após o refinamento pelos diversos modelos de interpolação e, a partir deste quadro, é possível afirmar que o processo de interpolação tem mais efeito para áreas com relevo mais íngremes e menos nas áreas mais planas, esse fato se justifica porque nas áreas mais planas não tem grandes diferenças entre a altitude do ponto interpolado e a altitude do próprio MDE SRTM original.

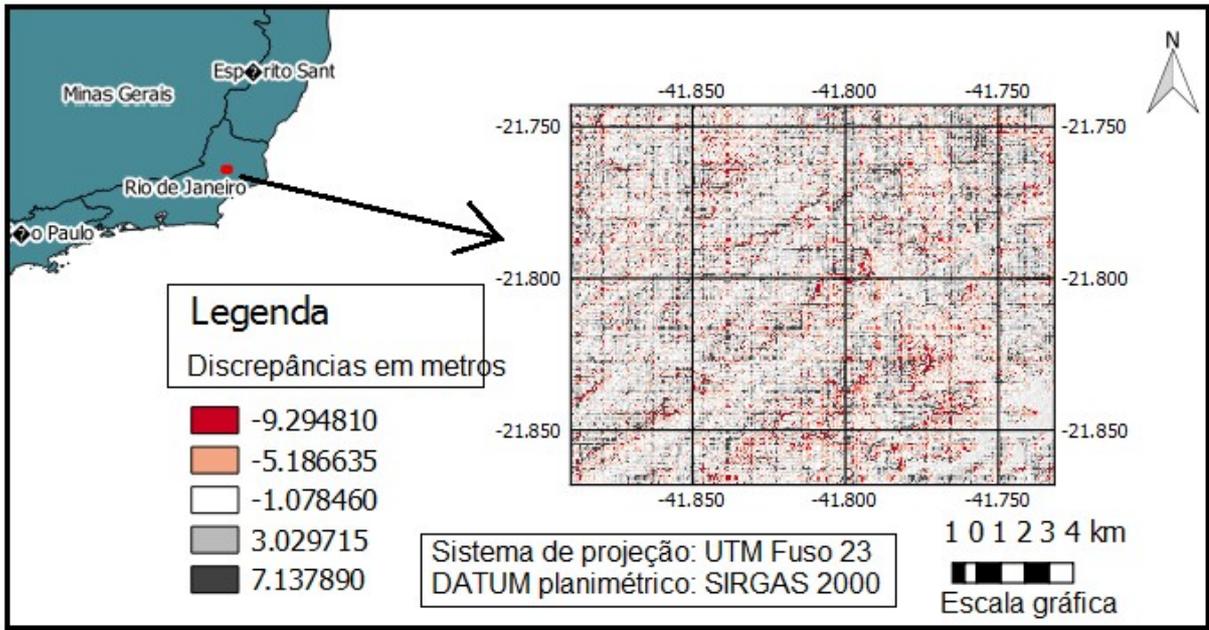
Os resultados apresentados no quadro 13 confirmam os resultados apresentados no quadro 6 e figuras 15 e 16, onde ilustram que o ganho de qualidade na interpolação de um MDE de 30 metros para 12,5 metros é baixa, pouco mais de 1 metro, diferente do que ocorre na interpolação de 90 metros para 30 metros, principalmente nas áreas mais acidentadas.

O quadro 13 demonstra, também, que as maiores diferenças do EQM e ZE90 dos MDEs refinados em relação ao MDE SRTM original encontram-se nos MDEs interpolados por krigagem e Topo to Raster, os demais MDEs apresentam poucas diferenças, indicando que os melhores métodos de interpolação de modelo digital de elevação são os modelos estocásticos, pois nestes modelos, a variação do terreno é levado em consideração.

Ainda sobre o resultado apresentado no quadro 13, há confirmação do resultado dos estudos de Celestino (2014), que apresenta que o método de interpolação “Topo to Raster” é indicado para interpolação de modelos digitais de elevação, visto que este modelo foi elaborado especificamente para modelar terrenos, e no quadro 13 indica que, além do “Topo to Raster”, somente o método da krigagem foi capaz de obter um novo MDE nas declividades do tipo montanhoso e escarpado, com uma classificação do PEC diferente do MDE SRTM original, esse fato pode ser explicado em função do peso que o modelo atribui às amostras em função da variação do terreno.

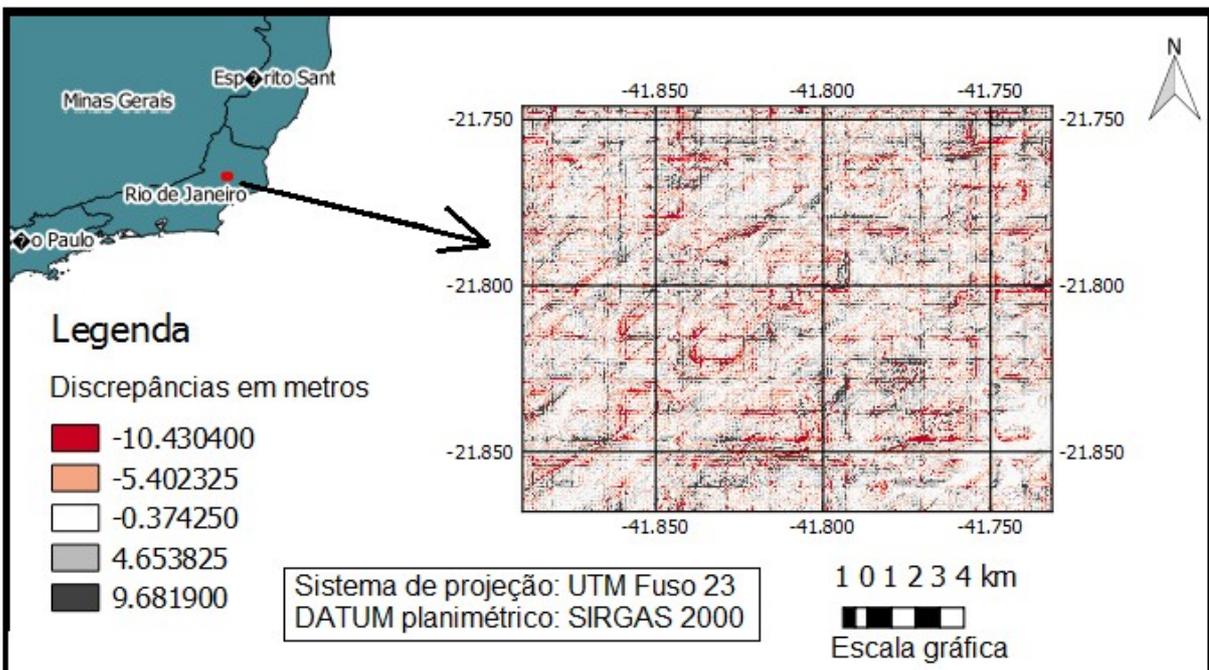
As figuras 21 e 22 ilustram os modelos gerados a partir dos valores das diferenças de altitudes obtidas pela subtração dos MDEs interpolados com o MDE SRTM, pelo método da Krigagem e “Topo to Raster” respectivamente.

Figura 21 – Discrepâncias do MDE gerado por Krigagem para o MDE SRTM original



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22 – Discrepâncias do MDE gerado por “Topo to Raster” para o MDE SRTM original



Fonte: Elaborado pelo autor

É possível perceber que a figura 22 contém uma presença maior de *pixels* vermelhos do que a figura 21, que representam as maiores discrepâncias, indicando que o método de interpolação “Topo to Raster” interferiu mais no modelo do que o método da krigagem. Estas mesmas figuras, apresentam que o erro máximo e mínimo são maiores quando aplicado o método “Topo to Raster”. Supõe-se que esse fato esteja ligado ao modelo matemático utilizado nos referidos métodos de interpolação, visto que o insumo e os pontos de controle foram os mesmos. A diferença entre os respectivos modelos, de acordo com Hutchinson (2009), é que o método “Topo to Raster” utiliza a soma ponderada dos quadrados dos resíduos das amostras e o método da krigagem dá pesos a diferentes amostras, sendo determinados por uma análise espacial baseado no semivariograma.

#### 4.4 AVALIAÇÃO PLANIMÉTRICA DO MDE SRTM

O quadro 14 apresenta os valores estatísticos da avaliação planimétrica do MDE SRTM, o cálculo do EQM, a determinação do ZE90 e a devida classificação do PEC, tendo como referência o mapeamento na escala de 1/25.000.

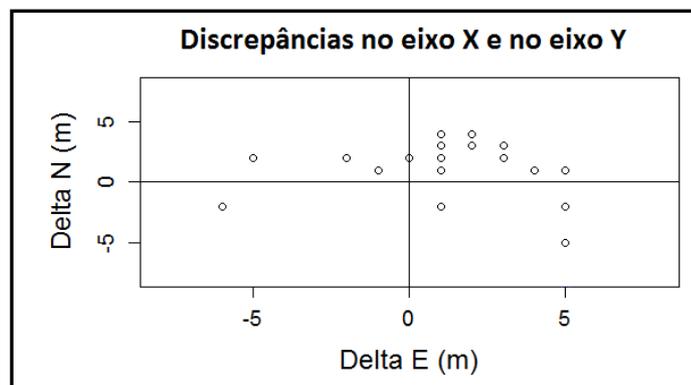
Quadro 14 – Avaliação planimétrica do MDE SRTM

Resultados	Média	Mínimo	Máximo	Mediana	EQM	ZE 90	Classificação do PEC
Medidas em metros	4,11	1,41	10,3	3,86	4,72	6,33	PEC 25.000 classe C

Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 23 apresenta as discrepâncias das coordenadas planimétricas da drenagem extraída automaticamente do MDE SRTM em relação à drenagem de referência, no eixo X e no eixo Y.

Figura 23 – Delta N e Delta E do MDE SRTM

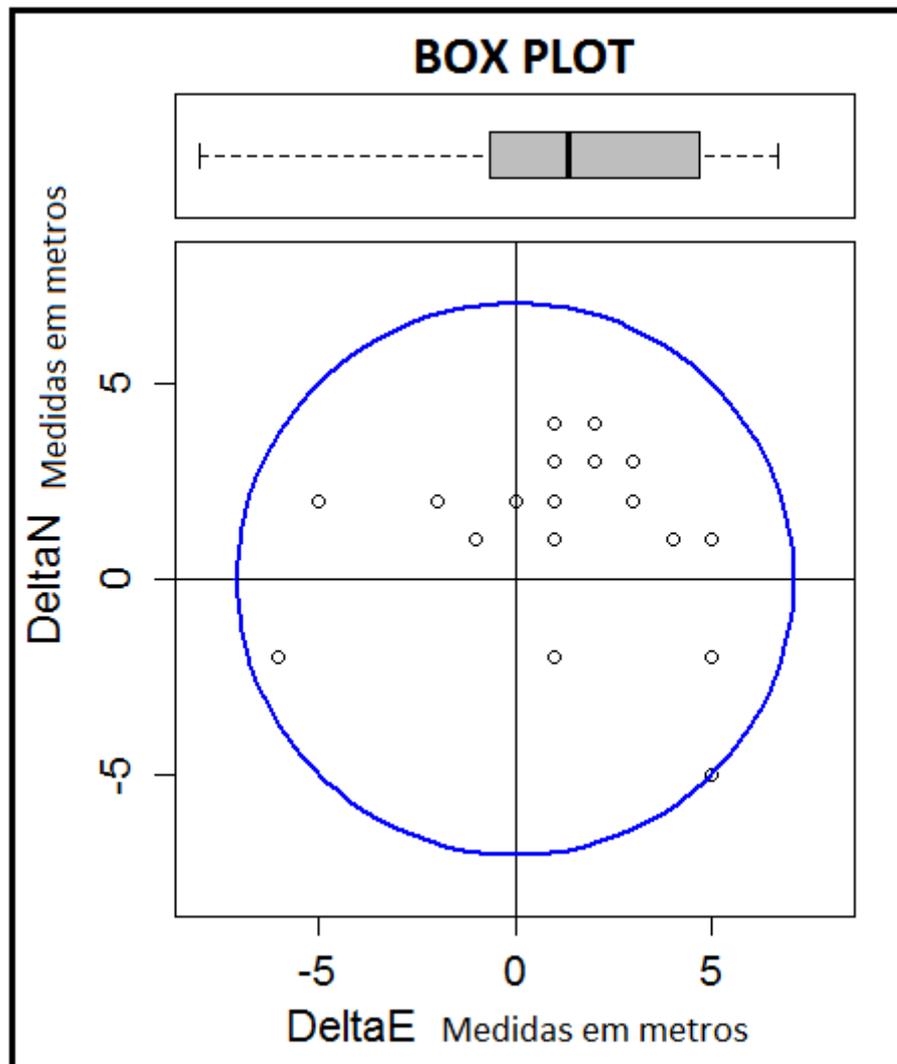


Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 23 ilustra que as maiores discrepâncias se concentram no eixo X.

A figura 24 apresenta as discrepâncias planimétricas do MDE SRTM em quartis, tanto no eixo N quanto no eixo E.

Figura 24 – Box plot das discrepâncias planimétricas do MDE SRTM



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 24 mostra que não foram identificados dados outliers para o conjunto de dados utilizados na avaliação planimétrica do MDE SRTM.

O quadro 15 apresenta a análise do cálculo do T-Student, realizado na avaliação planimétrica do MDE SRTM na região serrana do estado do Rio de Janeiro.

Quadro 15 – T-Student do MDE SRTM

<b>Cálculo do T-Student</b>		
	Eixo E	Eixo N
MÉDIA	1,900	-0,500
D.P.	14,707	3,220
VAR	216,305	10,368
MAX	63,000	9,000
MIN	-5,000	-4,000
CALCULO T	<b>0,388</b>	-0,466

SIGNIFICANCIA	GRAUS DE LIBERDADE
10%	19
T TABELADO	<b>1,325</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado apresentado no quadro 15 indica que o dado avaliado está livre de tendência, visto que o T calculado é menor do que o T tabelado.

O quadro 16 apresenta o resultado do teste do Qui-Quadrado, realizado na avaliação planimétrica do MDE SRTM na região serrana do estado do Rio de Janeiro.

Quadro 16 – Teste do Qui-Quadrado do MDE SRTM

<b>QUI QUADRADO (QQ) CALCULADO</b>			
CLASSE	IMAGEM		QQ TABELADO
	X	Y	<b>12,44</b>
A	-7,691	-0,369	
B	-2,769	-0,133	
C	-1,923	-0,092	

## Teste do Qui-Quadrado

CLASSE	PLANIMETRIA		ESCALA = 1/	25.000
	PEC	EP		
A	12,50 m	7,50 m	5,303	5,303
B	20,00 m	12,50 m	8,839	8,839
C	25,00 m	15,00 m	10,607	10,607

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado apresentado no quadro 16 indica que o MDE SRTM é compatível com a escala de 1/25.000 classe A, no entanto, a avaliação do mesmo tendo como base o PEC, este é compatível apenas com o PEC C (Analogico) para a escala de 1/25.000.

Os resultados obtidos na avaliação, foram extrapolados para todo o território brasileiro, haja vista que a análise foi realizada somente na região serrana do Estado do Rio de

Janeiro. Outros testes devem ser aplicados para verificar as consistências ou não destes resultados.

O quadro 14 apresenta os resultados da avaliação planimétrica do MDE SRTM, não sendo levado em consideração a influência do erro posicional que pode ocorrer na altitude do ponto, haja vista que os dados obtidos por meio de sistemas GNSS de dupla frequência chegarem a precisão centimétrica, enquanto que o pixel analisado do MDE SRTM na presente pesquisa é de 30 m.

#### 4.5 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS DADOS ALTIMÉTRICOS DO SATÉLITE ICESAT

O resultado da avaliação da qualidade dos dados altimétricos do satélite IceSat é ilustrado no quadro 17.

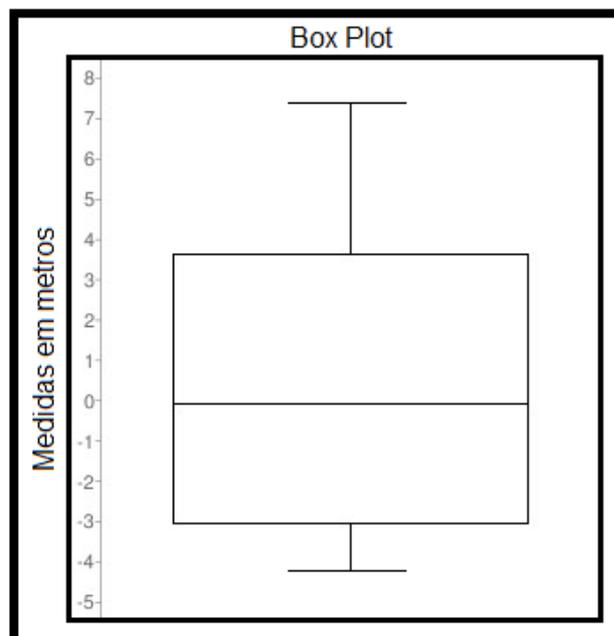
Quadro 17, Avaliação dos dados altimétricos oriundos do satélite IceSat

Valores em metros

EQM	ZE 90	Máximo	Mínimo	Média	Mediana	PEC
2,16	3,97	4,77	-6,34	-0,59	-0,01	25.000 classe A

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 25 – Box plot dos dados IceSat



Fonte: Elaborado pelo autor

As discrepâncias entre os valores de altitude dos pontos oriundos do satélite IceSat, comparados com os valores de altitude do MDE de referência oriundos de dados LIDAR, são

compatíveis com a escala de 1/25.000, indicando há possibilidade de uso desses dados para validar modelos de média e baixa escala, como o MDE SRTM por exemplo.

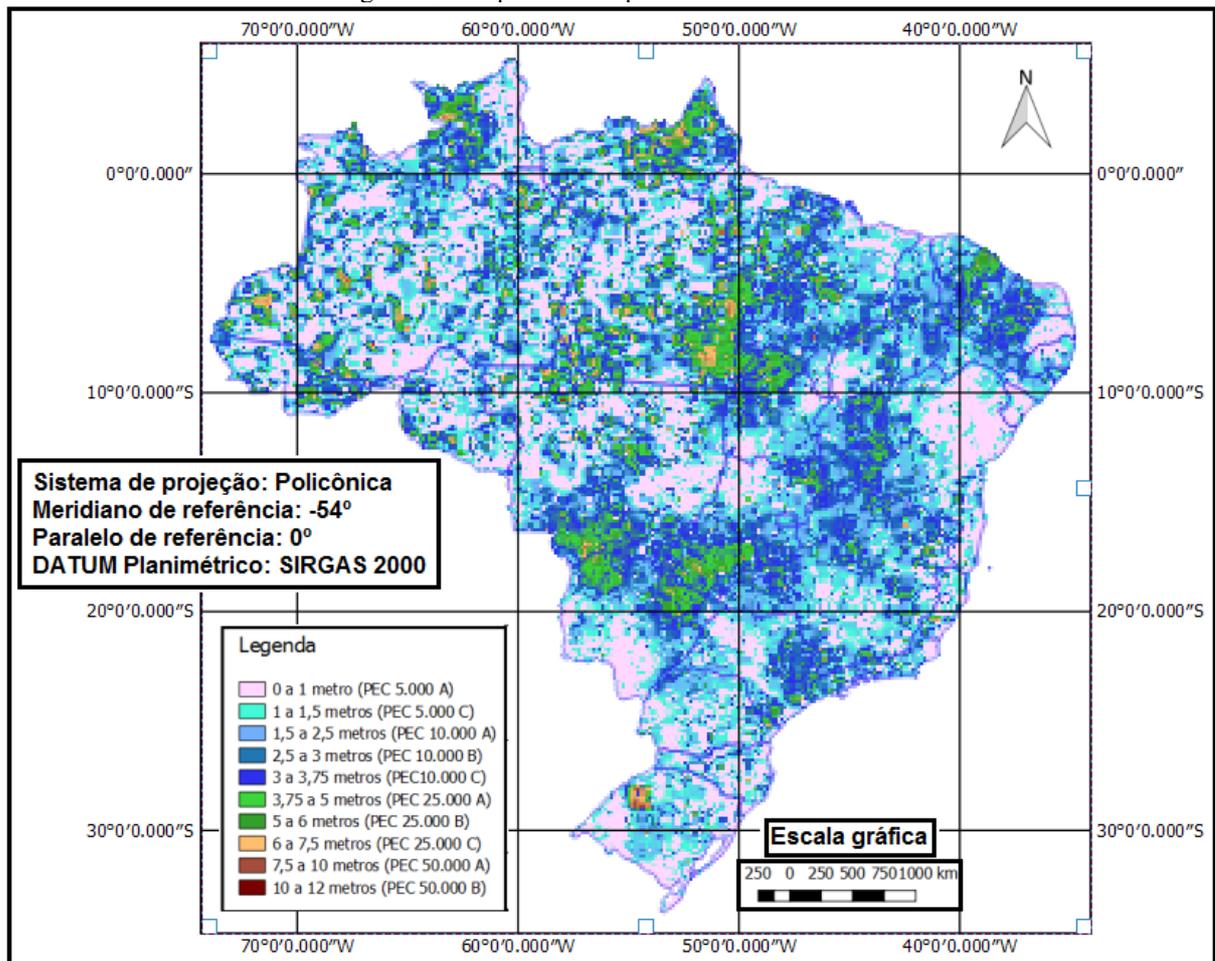
O quadro 17 apresenta, também, que o ZE90 é inferior a 4 metros e que o EQM é de 2,16 metros indicando que os dados altimétricos oriundos do satélite IceSat tem grande potencialidade de validação de MDEs em função da qualidade e densidade ao longo do território brasileiro.

O'Loughlin et al. (2013) afirmam que, ao avaliaram os dados do satélite IceSat ao longo do rio Congo entre as cotas 1400 e 1500 metros no sudeste da República Democrática do Congo, encontraram valores de discrepância na média de 10 cm, assim como Urban et al. (2008) encontraram 11,5 cm, o que não está muito longe do resultado encontrado neste resultado ilustrado no quadro 17, que apresenta uma média de 59 cm, sendo que tanto os resultados encontrados no presente estudo como nos mencionados, indicam que o dado IceSat pode ser utilizado para avaliar o MDE SRTM por atender o critério de Merchant (1982), quando determinou que é necessário que o modelo de referência deve ter pelo menos 3 vezes a qualidade do modelo que será avaliado.

#### **4.6 AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA ALTIMÉTRICA DO MDE SRTM AO LONGO DO TERRITÓRIO BRASILEIRO TENDO OS PONTOS ALTIMÉTRICOS DO SATÉLITE ICESAT COMO REFERÊNCIA (MDS)**

Para a avaliação altimétrica do MDE SRTM, foi gerado o “Mapa de discrepâncias do MDE SRTM” para todo o território brasileiro, tendo como referência, os pontos altimétricos oriundos do satélite IceSat. Este mapa foi gerado a partir do processo de interpolação dos valores das diferenças encontradas entre o MDE SRTM e o IceSat, com um pixel de 5 km e classificado em forma de cores em função da variação do PEC, que é ilustrado na figura 26.

Figura 26– Mapa de discrepâncias do MDE SRTM



Fonte: Limites do Brasil fornecido pelo IBGE

Conforme ilustrado na figura 26, a qualidade do MDE SRTM não é uniforme, varia ao longo do território, seja em função da declividade, espelho d'água, vegetação ou qualquer outro motivo, porém, existem pontos de concentrações onde estão as melhores precisões, por exemplo no litoral do nordeste e do sul, provavelmente o relevo acidentado do litoral da região sudeste tenha interferido para que a precisão não tenha sido equivalente com os demais litorais.

Existe uma concentração de áreas onde o MDE SRTM possui uma qualidade inferior, como no pantanal Mato-Grossense e no norte do Estado do Tocantins, já na região do Jalapão, supõe-se que a piora seja em função da presença de água na região, pois quanto maior o conteúdo hídrico, maior a constante dielétrica, refletividade e espalhamento, que interferem diretamente no retroespalhamento. WARING et al. (1995).

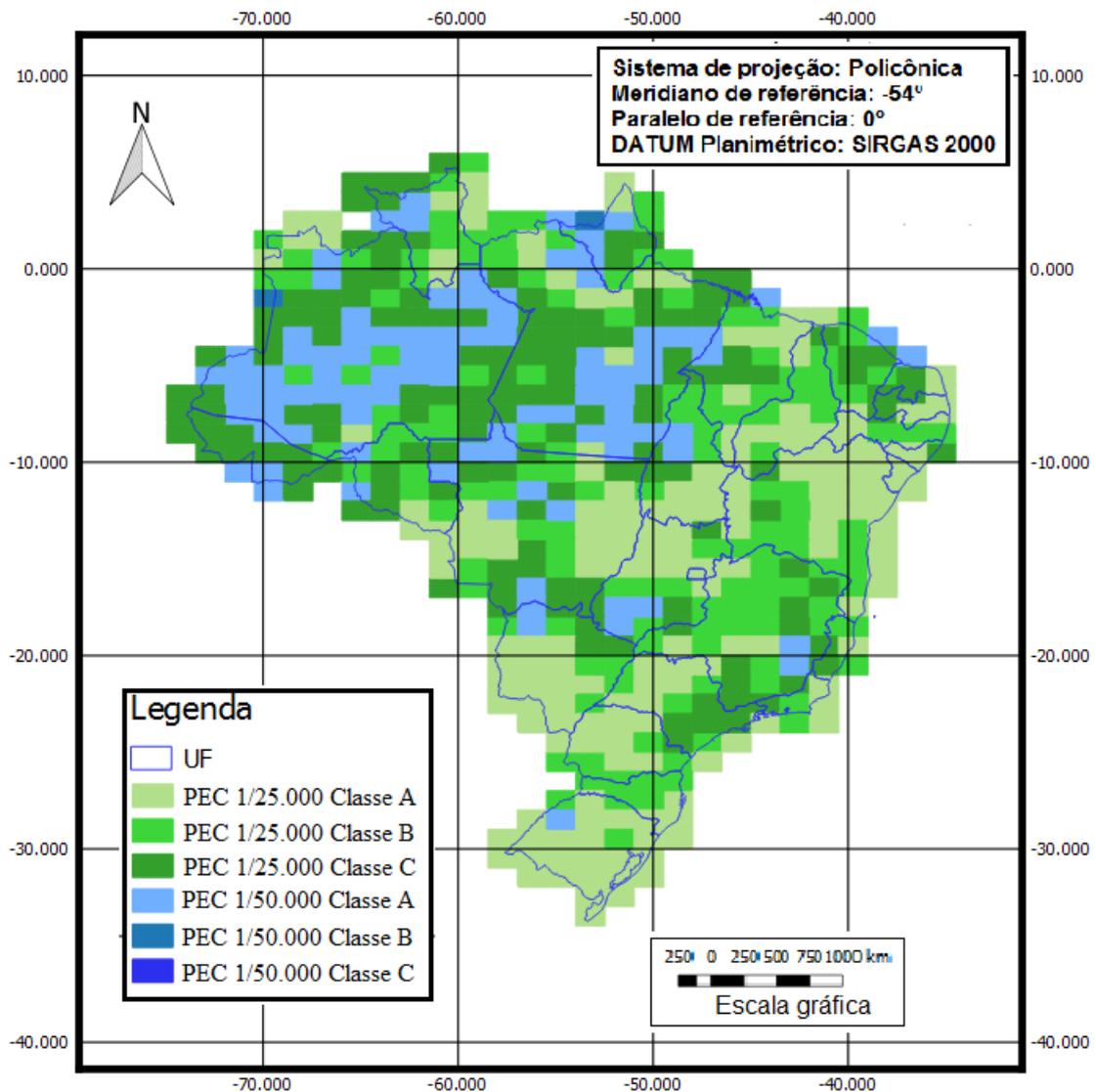
A partir do mapa ilustrado na figura 26, tem-se o conhecimento da qualidade do MDE SRTM ao longo de todo o território brasileiro e que é possível delimitar as áreas

individualizadas por classes do PEC, onde a melhor classificação foi o PEC A para a escala 1/5.000 e a pior classificação foi o PEC B para a escala 1/50.000.

Com o mapa de discrepâncias do MDE SRTM, ilustrado na figura 26, é possível identificar e delimitar as áreas onde o MDE SRTM necessita de um refinamento de modo a torná-lo compatível com o PEC A para a escala 1/50.000 ou melhor.

Visando obter um mapa que indique a qualidade do MDE SRTM para todo o território brasileiro para a articulação de folha topográfica do mapeamento sistemático brasileiro, foi gerado um novo mapa denominado de “Mapa de qualidade do MDE SRTM por folha de 1/250.000”, levando em consideração apenas os pontos de referência, IceSat, ilustrado na figura 27.

Figura 27 – Mapa da qualidade do MDE SRTM por folha de 1/250.000



Fonte: Limites das quadrículas do mapeamento sistemático na escala de 1/250.000 fornecidos pelo IBGE

Note-se, pela figura 27 que todos os resultados convergem para a qualidade do MDE SRTM compatível com o PEC A (analógico) para a escala 1/50.000 para o Brasil, onde mais de 90% das folhas se encontram nesta classe ou melhor. Com o mapa da qualidade do MDE SRTM ao longo de todo do território brasileiro, se tem o conhecimento local e regional da exatidão do MDE SRTM.

O mapa ilustrado na figura 27, mostra algumas folhas topográficas de 1/250.000 onde o MDE SRTM é compatível com a escala de 1/25.000 e outras 1/50.000 sendo estas com uma maior concentração na região norte do Brasil. Esse resultado pode ser em função da presença de vegetação, onde predomina árvores de portes altos.

#### **4.7 ANÁLISE COMPARATIVA POR AMOSTRAGEM ENTRE A QUALIDADE DO MDE SRTM AVALIADO COMO (MDS) E (MDT)**

O apêndice B, apresenta os valores dos EQMs e dos ZE90s, além de apresentar as classificações dos PECs, para cada amostra selecionada, referentes à avaliação da qualidade do MDE SRTM tendo como referência os pontos de controle PPP e os pontos IceSat.

A diferença dos indicadores de qualidade (EQM, ZE90 e PEC) para o MDE SRTM quando utilizados os pontos de controle medidos em campo (MDT) como referência, em relação ao MDE SRTM quando utilizados os pontos IceSat (MDS) como referência, está relacionada à presença de vegetação.

Existem algumas divergências apresentada no apêndice B para as classificações dos PECs do MDE SRTM tendo como referência os pontos de controle de campo (PPP), e do MDE SRTM em relação aos pontos IceSat, este fato se justifica na medida em que os pontos de controle são medidos no terreno enquanto os pontos IceSat são medidos sobre os objetos visíveis.

Ainda sobre os resultados apresentados no apêndice B, as maiores divergências entre os respectivos PECs se concentram na região norte do Brasil, resultado esperado, visto que, de acordo com mapa de vegetação publicado pelo IBGE (2018), a vegetação predominante na região norte é de floresta, que tem as maiores alturas entre todos os biomas.

A figura 28 mostra espacialmente a localização das folhas topográficas com as maiores divergências entre as classificações dos PECs, quando comparados o MDE SRTM tendo como referência os diferentes tipos de pontos de controle, considerando as amostras usadas no trabalho de avaliação.

Figura 28 – Amostras que contemplam as maiores divergências entre os PECs do MDE SRTM tendo pontos IceSat e pontos PPP como referência.



Fonte: Google, modificado pelo autor

É possível notar pela figura 28, que as amostras que foram classificadas com o PEC B (Analogico) para a escala 1/100.000 e piores se concentram basicamente na região amazônica, ocorrendo poucas amostras em outras regiões do território brasileiro (1 no nordeste, centro-oeste, e sudeste). As características comuns entre essas amostras, é a presença forte de vegetação de grande porte, principalmente na região norte. Para estas áreas, os MDEs obtidos na banda L são mais indicados, como é o caso do ALOS/PALSAR.

Considerando que o *pixel* avaliado não seja influenciado por seus vizinhos, pode-se, ainda, extrair do apêndice B, a informação de que é possível utilizar dados medidos no terreno para avaliar a qualidade de modelos de superfície, pois, nestes casos, os valores do PEC do MDE SRTM é semelhante quando utilizados como verdade de campo um modelo de superfície ou pontos medidos no terreno em solo exposto.

No entanto, com exceção das áreas de solo exposto, não é possível obter o valor da altitude do *pixel* do MDE SRTM sem a influência dos *pixels* vizinhos, portanto, não é

aconselhável a utilização dos pontos de controle medidos no terreno para a avaliação dos dados MDE SRTM em áreas com a presença de vegetação.

Nota-se no apêndice B que em algumas regiões as discrepâncias encontradas na avaliação do MDE SRTM como MDS em relação ao MDT é pequena o suficiente para manter a classificação do PEC, ou seja, nestas regiões, apesar do MDE SRTM ser de fato um MDS, tem a mesma qualidade de um MDT, podendo ser considerado como tal, esse fato pode ser explicado pela presença de vegetação rasteira ou até mesmo a ausência dela. As regiões que apresentam esta compatibilidade são parte da região nordeste, centro-oeste e sul do Brasil.

#### 4.8 ANÁLISE DO USO DE DIVERSAS QUALIDADES DE MDEs NO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ORTOIMAGENS

O quadro 18 apresenta os resultados obtidos da qualidade das ortofotografias geradas com diversas qualidades de MDEs.

Quadro 18– Comparativo do PEC das ortofotografias geradas com diversos MDEs e número de pontos de controle.

Teste	MDE	Pontos de Controle	EQM Plan	PEC ORTO	PEC MDE
1	Fotogramétrico	6	7	50k classe A	10.000 Classe A
2		7	2,2	25.000 Classe A	
3		9	2,1		
4		12	2,2		
5	Alos Palsar	6	6,5	50k classe A	25.000 Classe C
6		7	2,2	25.000 Classe A	
7		9	2,2		
8		12	2,1		
9	SRTM 30 metros	6	6,5	50k classe A	
10		7	2,2	25.000 Classe A	
11		9	2,1		
12		12	2,1		
13	SRTM 90 metros	6	14,89	100k classe A	50.000 Classe C
14		7	7,2	50.000 Classe A	
15		9	7,1		
16		12	7		

Fonte: Elaborado pelo autor

O quadro 18 ilustra a relação de influência de 3 elementos no resultado final do PEC no processo de geração de ortofotos, são eles: o número de pontos de controle e sua distribuição espacial, utilizados para ortorretificar uma imagem; resolução espacial da própria imagem a ser ortorretificada e qualidade do MDE utilizado no processo de ortorretificação.

A resolução espacial da imagem afeta o processo devido ao tamanho do *pixel*, pois quanto menor mais fácil será de identificar objetos de menores dimensões, com isso, obtendo a posição dos pontos de controle mais confiável na referida imagem para ortorretificar, neste caso, a resolução espacial da imagem foi de 2,5 metros.

O quadro 18 apresenta os resultados dos PECs das ortofotos geradas com diversos MDEs, a partir de imagem PRISM não ortorretificada, sendo que a classificação do PEC do MDE fotogramétrico foi fornecido pela prefeitura e as demais, obtidas a partir da aplicação do *script* do IBGE com base nos pontos de campo (PPP) apenas no município de Itaguaí.

Na etapa de avaliação do uso do MDE SRTM para geração de ortofotos, o quadro 18 ilustra que a qualidade da ortofoto gerada está ligada a 3 fatores, o primeiro quanto ao número de pontos de controle bem distribuídos utilizados na geração da ortofoto, que, de acordo com o quadro, quando utilizados 6 pontos de controle, obtém-se um resultado com qualidade inferior que aquela obtida quando se utilizam mais pontos no processo de ortorretificação, já acima de 7 pontos o EQM praticamente não varia, indicando que coletar muitos pontos em campo para a geração de ortofotos significa desperdiçar recursos de tempo e dinheiro no processo de ortorretificação da imagem, concluiu-se, assim, que a utilização de 7 pontos bem distribuídos é o ideal para o trabalho realizado.

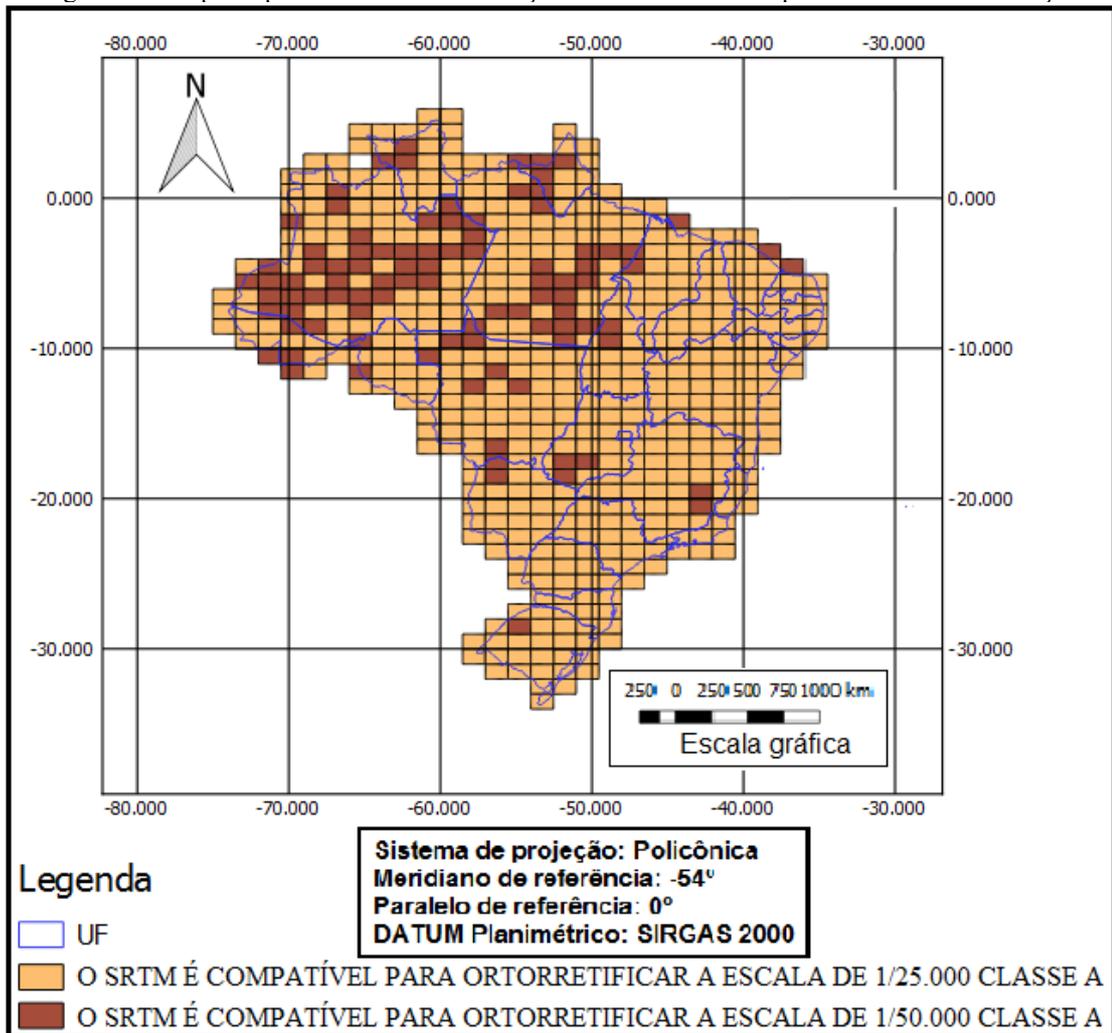
O segundo elemento que o quadro indica ter influência no resultado do PEC é a resolução da imagem ALOS PRISM, pois para uma imagem com resolução de 2,5 metros, mesmo com um MDE oriundo da fotogrametria e com mais de 7 pontos de controle, não é suficiente para gerar uma ortofoto com PEC melhor do que o PEC A (Analogico) para a escala 1/25.000.

O terceiro e último elemento que tem influência no resultado final da ortofoto gerada, de acordo com o mesmo quadro, é o MDE utilizado, existe uma relação do PEC do MDE com o PEC da ortofoto gerada, e que de acordo com Maranhão (2011), esta influência é maior em áreas mais íngremes e mínima em áreas mais plana.

#### 4.9 ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DO USO DO MDE SRTM

Após a obtenção dos resultados do quadro 18, fez-se uma associação com os resultados da figura 27, substituindo as informações dos PECs 1/25.000 A, B e C por 1/25.000 A e 1/50.000 A, B e C por 1/50.000 da figura 27, gerando a figura 29, onde ilustra a potencialidade do uso do MDE SRTM de 30 metros de resolução espacial no processo de ortorretificação.

Figura 29– Mapa da potencialidade da utilização do MDE SRTM no processo de ortorretificação



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 29 mostra que é possível o uso do MDE SRTM para ortorretificar imagens para a escala de 1/50.000 em todo o território brasileiro, como foi o caso das imagens RapidEye, e a escala de 1/25.000 em algumas áreas do território, sendo estas, mais da metade do Brasil.

## 5 CONCLUSÕES

O presente estudo indica que a qualidade posicional do MDE SRTM possui uma classificação do PEC para a escala de 1/25.000 classe A.

Os resultados indicam que é possível o uso regionalizado do MDE SRTM para fins cartográficos até a escala de 1/25.000.

Os resultados obtidos no presente estudo apresentaram que a qualidade do MDE ALOS de 12,5 metros de resolução espacial possui pouca ou nenhuma melhoria em relação à qualidade do MDE SRTM de 30 m, pois na avaliação do PEC de ambos modelos, em diversas áreas com classes de declividades variadas, os resultados foram semelhantes.

É possível afirmar que, a partir dos resultados obtidos, a qualidade do MDE SRTM varia com a declividade, obtendo menor qualidade em áreas mais acidentadas, porém, é possível melhorar a qualidade do mesmo nestas áreas mais íngremes por meio da aplicação de modelos de interpolação, associados a dados condicionantes de melhor qualidade (pontos de campo PPP) densificando a amostra, cujos modelos mais adequados identificados neste estudo foram os métodos da krigagem e Topo to Raster.

O método adotado para a geração do “mapa de discrepâncias do MDE SRTM”, o qual nos permite conhecer a qualidade do MDE SRTM em todo o território brasileiro, se mostrou satisfatório, uma vez que foi possível mensurar a qualidade do MDE SRTM ao longo do território brasileiro, por meio de pontos altimétricos do satélite IceSat e por meio de interpolação estocástica (krigagem) para estimar o valor da discrepância do MDE SRTM em locais onde não haviam pontos IceSat, sem perder a qualidade do referido mapa.

Pelas análises realizadas, ficou demonstrado que a partir dos resultados obtidos, que a qualidade do MDE SRTM é compatível com o PEC A (Analogico) e PEC B (Digital) para a escala 1/50.000 para as regiões norte, nordeste e centro-oeste, e PEC B (Analogico) e PEC C (Digital) para a escala 1/50.000 para as regiões sul e sudeste, e de acordo com estes mesmos resultados, 93,97% do MDE SRTM no Brasil é classificado com o PEC A (Analogico) e B (Digital) para a escala de 1/50.000.

Os resultados obtidos apontam que o MDE SRTM é utilizável no processo de ortorretificação para as escalas de 1/50.000 e 1/25.000, sendo 1/50.000 abrangendo a região norte e 1/25.000 cobrindo as regiões centro sul do Brasil.

Após análise dos resultados obtidos no presente estudo, é possível afirmar que o MDE SRTM, que é um MDS, pode ser utilizado como sendo um MDT para algumas regiões do Brasil, parte da região nordeste, centro-oeste e sul do Brasil.

Finalmente, pode-se afirmar diante dos resultados obtidos, que o MDE SRTM é incompatível, até mesmo com um processo de interpolação, para geração de MDE em escala melhor que 1/25.000, em qualquer classe de declividade.

## 6 RECOMENDAÇÕES

É recomendável realizar a avaliação do PEC do MDE de 5 metros de resolução, como o AW3D, para avaliar até que ponto, o tamanho do pixel influencia na qualidade do MDE.

Recomenda-se também, realizar análises do PEC do MDE SRTM individualizado por tipos de biomas e em áreas com grandes massas d'água, uma vez identificado que a vegetação e massa d'água também influenciam na acurácia do MDE SRTM.

Novas avaliações sobre o uso do MDE SRTM nas gerações de ortofotos também são recomendadas, pois a amostra desta análise foi pequena, apenas o município de Itaguaí, no Estado do Rio de Janeiro, em terreno do tipo plano e com PEC do MDE SRTM local compatível com a escala de 1/25.000.

Outra avaliação que se recomenda neste estudo, é com o uso de articulações compatíveis com as escalas maiores do mapeamento sistemático brasileiro, como as escalas de 1/100.000, 1/50.000 e 1/25.000.

## 7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Araújo, E. H. G.; KUX, H. J. H., ALBUQUERQUE, P. C. G. **Ortorretificação de imagens Quickbird orstandard: levantamento planialtimétrico de pontos de apoio e métodos de correção geométrica.** São José dos Campos: INPE, 2007.

ASTER GDEM Validation Team. *ASTER Global Digital Elevation Model Version 2: Summary of Validation Results.* 2011. Disponível em: <[http://www.jspacesytems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary\\_GDEM2\\_validation\\_report\\_final.pdf](http://www.jspacesytems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf)>. Acesso em: ago. 2017.

BARBOSA, W. W. de P.; BIAS, E. de S. Análise das Potencialidades do Uso de Imagens Orbitais de Alta Resolução Espacial Visando Atender as Especificações da Norma Técnica e Georreferenciamento de Imóveis Rurais. **Anuário do Instituto de Geociência – UFRJ.** 42(1): 618-629.

BARNETT, V.; LEWIS, T. **Outliers in statistical data.** 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1994.

BENVENISTE, J. **Radar altimetry: past, present and future.** Berlin: *Coastal Altimetry*, 2011.

BERNINI, T. A.. **Utilização de imagens ALOS/PALSAR no mapeamento digital de atributos físicos dos solos.** 101f. Tese (Doutorado em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária, Recursos Naturais e Proteção Ambiental). Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, RJ: UFRRJ, 2016. 82-90.

BIAS, E. S.; RIBEIRO, R. J. C.; BAPTISTA, G. M. M.; BERNARDI, J. V. E. *Avaliação da Exatidão do MDE obtido por meio do SRTM e pela carta do IBGE na escala 1/100.000.* **Revista Brasileira de Cartografia.** 2010.

BRASIL. Decreto N° 89.817 de 20 de Junho de 1984. Normas Técnicas Da Cartografia Nacional. 1984. Poder Executivo, Brasília, DF, 20 jun. 1997. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ decreto/1980-1989/D89817.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ decreto/1980-1989/D89817.htm)>. Acesso em: ago. 2017.

BURROUGH P. A.; McDONNELL R. A. *Principles of Geographical Information System.* **Oxford University Press,** 1998.

de CARVALHO, J. A. B; da SILVA, D. C. Métodos para avaliação da acurácia posicional altimétrica no Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia,** 70(2), 725-744, 2018.

CELESTINO, V. S. **Considerações sobre a qualidade altimétrica para projetos de usinas hidrelétricas.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

CELESTINO, V. S.; PHILIPS, J. W. *Avaliação altimétrica para projetos de usinas hidrelétricas.* Rio de Janeiro: **Revista Brasileira de Cartografia,** 2015.

CHAGAS, C. S.; FILHO, E. I. F.; ROCHA, M. F.; JÚNIOR, W. D. C.; NETO, N. C. S. *Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. 2010.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley and Sons Inc., 1991.

CRUZ, C. B. M., BARROS, R. S., RABACO, L. M. L. “Planialtimetric Accuracy Evaluation of Digital Surface Model (DSM) and Digital Terrain Model (DTM) Obtained from Aerial Survey with LIDAR.” **ISPRS. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIX-B1 (1)**. Copernicus Publications. 2012.

DISSERTA, G. N.; DUTRA, L. V.; FREITAS, C. **Avaliação de dados polarimétricos do sensor ALOS PALSAR para classificação da cobertura da Terra da Amazônia**. São José dos Campos: INPE, 2009.

DOBSON, M. C.; ULABY, F. T.; PIERCE, L.E.; SHARIK, T. L.; BERGEN, K. M.; KELLNDORFER, J.; KENDRA, J. R.; LI, E.; LIN, Y. C.; NASHASHIBI, A.; SARABANDI, K.; SIQUEIRA, P. *Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/X-SAR*. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. 1995.

DOBSON, M. C. Forest information from Synthetic Aperture Radar. **Journal of Forestry**. n. 98, p. 41-43. 2000.

ELKHRACHY, I. Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia. **Ain Shams Engineering Journal**. (2017).

FERREIRA, F. R. **Segmentação do espaço urbano por meio da tecnologia Lidar aerotransportado**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

GABOARDI, C.; SANTOS, A. R. P.; OLIVEIRA, C. L. Avaliação da Precisão Vertical dos Modelos SRTM para a Amazônia. **Revista Brasileira de Cartografia**. 2005.

GOMES, M. M. “**Method expeditious os new routes of railway for freight transportation**.” São Carlos, 2011, 191p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

HALL, A. C.; SCHUMANN, G.; BAMBER, P. D.; BATES, P. A.; TRIGG, M. A. *Geodetic corrections to Amazon River water level gauges using ICESat altimetry*. Florida, Water Resources Research, 2012.

HEIPKE, C.; KOCH, A.; LOHNANN, P. *Analysis of SRTM DTM – Metodology and Practical Results*. **ISPRS Commission. IV Symposium**. Ottawa. 2002.

HÖHLE, J., & HÖHLE, M. *Accuracy Assessment of Digital Elevation Models by Means of Robust Statistical Methods*. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. 2009.

HÖHLE, J., & PEDERSEN, C. O. *A New Method for Checking the Planimetric Accuracy of Digital Elevation Models Data Derived by Airborne Laser Scanning*. In **Proceedings of the**

**9th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences**, University of Leicester. Leicester, UK. 2010.

HUTCHINSON, M. F.; STEIN, JOHN A.; STEIN, JANET L.; XU, T. *Locally Adaptive Gridding of Noisy High Resolution Topographic Data*. in: **18th World IMACS/ MODSIM Congress**. Austrália. 2009.

IBGE. *Avaliação planialtimétrica de dados ALOS/PRIMS Estudo de Caso: Itaguaí-RJ*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/RelatorioAvaliacaoAlos.pdf>>. Acesso em: abr. 2018.

JACOBSEN, K. *Orientation of High Resolution Optical Space Images*. **The ASPRS Annual Conference 2007: Identifying Geospatial Solutions**, Tampa, Florida. Proceedings, 2007.

KIMBER, A. C. *Exploratory data analysis for possibly censored data from skewed distributions*. **Journal of the Royal Statistical Society**: series C (applied statistics). 1990.

KRAUS, K. *Photogrammetrie. Band 1: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. 7 Ed. Berlin, Germany: Editora Walter de Gruyter, 2004.

LECKIE, D. G.; RANSON, K. J. **Forestry applications using imaging radar**. In: Principles and Application of Imaging Radar. New York: John Wiley. p. 435-509. 1998.

MAAS, H. G. *Methods for Measuring Height and Planimetry Discrepancies in Airborne Laserscanner Data*. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. 2002.

MARANHÃO, M. R. de A.; MACHADO, M. do V.; ANTUNES, M. A. H.; DEBIASI, P.; YOSHIKAWA, T. S. **Avaliação da ortorretificação de imagens de alta e média resolução espacial utilizando MDE's de cartas 1/10.000, Aster e SRTM**. São José dos Campos, INPE. 2011.

MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase-sinóticos. **Universidade do vale do itajaí**. São Paulo (2009).

MERCHANT, D. C. *Spatial accuracy standards for large scale line maps*. In: **Technical Papers of the American Congress on Surveying and Mapping**, v. 42, 1982. p. 222-231.

MICELI, S. B.; DIAS, M. F.; SANTOS, A. R. P.; FERNANDES, C. M. *Avaliação Vertical de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) em diferentes configurações Topográficas para Médias e Pequenas escalas*. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 63/01. 2011.

MIKHAIL, E.; ACKERMANN, F. **Observations and Least Squares**. University Press os America. 1976.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. 2 Ed. Brasília: Editora Embrapa Informação Tecnológica, 2010.

MIRANDA, E. E. de. **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em:<<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: setembro de 2017.

MITISHITA, E. A. **Monorestituição de imagens do satélite de alta resolução IKONOS2 (GEO), utilizando-se da transformação DLT e modelo digital de terreno.** São José dos Campos: INPE, 2003.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações.** São Paulo: ed. UNESP. 2008.

MOURA, L. Z.; BIAS, E. S.; BRITES, R. *Avaliação da Acurácia Vertical de Modelos Digitais de Elevação (MDES) nas bacias do Paranoá e São Bartolomeu.* **Revista Brasileira de Cartografia**, n.66/01, 2014.

MOZAS, A. T. C., UREÑA, M. A., & PÉREZ, J. L. *Accuracy of Contour Lines Using 3D Bands.* **International Journal of Geographical Information Science** 27 (12). Taylor & Francis: 2362–74. 2013.

NAKAHORI, A. A. G. **Geração e avaliação de ortoimagem ALOS/PRISM 1B1. Estudo de caso para São Gabriel – RS.** Porto Alegre: UFRGS, 2010.

O'LOUGHLIN, F.; TRIGG, M. A.; SCHUMANN, G. J.-P.; BATES, P. D. *Hydraulic characterization of the middle reach of the Congo River.* v. 49. Florida: Water Resources Research, 2013.

ORLANDI, A. G.; **Avaliação da acurácia do modelo SRTM para o Brasil.** UnB. Brasília. 2016.

PINTO, M. S.; AMORIM, A. *Ortorretificação de imagem Quickbird com diferentes modelos digitais de terreno: análise da qualidade geométrica.* **Revista Brasileira de Cartografia** Nº 63 Edição Especial 40 anos. 2011.

PRITCHARD, H. D.; LUTHCKE, S. B.; FLEMING, A. H. *Understanding ice-sheet mass balance: progress in satellite altimetry and gravimetry.* **Journal of Glaciology**, v. 56, n. 200. 2010.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. *The shuttle radar topography mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar.* **ISPRS: Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57. doi: 10.1016/S0924-2716(02)00124-7, 2003.

RAO, K. S. *Validation of Digital Elevation Model Derived from Shuttle Radar Topography Mission using GPS Field measurements.* 2004. Disponível em: <[www.gisdevelopment.net/tecnology/gps/ma03033abs.htm](http://www.gisdevelopment.net/tecnology/gps/ma03033abs.htm)> Acesso: 28 fev 2018.

REINOSO, J. F. 2011. *An Algorithm for Automatically Computing the Horizontal Shift between Homologous Contours from DTMs.* **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 66 (3): 272–86.

RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C. S.; BELZ, J. E.; CHAPIN, E. C.; MARTIN, J. M.; DAFFER, S. *An assessment of the SRTM topographic products.* Pasadena, CA: JPL, 2005.

SANTOS, A. P.; MEDEIROS, N. G., SANTOS, G. R., & RODRIGUES, D. D. *Controle de Qualidade Posicional Em Dados Espaciais Utilizando Feições Lineares*. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 2. 2015.

SANTOS, S. *Uso da Geoestatística na Avaliação da Acurácia Posicional Absoluta de dados Geoespaciais*. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, doi: 10.1590/S1982-21702017000300027. 2017.

SATGE, F.; DENEZINE, M. ; PILLCO, R.; TIMOUK, F.; PINEL, S.; MOLINA, J.; BONNET, M. P. Absolute and relative height-pixel accuracy of SRTM-GL1 over the South American Andean Plateau. 2016. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**. 121, 157-166.

SCHUTZ, B. E.; ZWALLY, H. J.; SHUMAN, C. A.; HANCOCK, D.; DIMARZIO, J. P. *Overview of the ICESat Mission*. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 21. Florida. 2005.

SOUZA, J. M.; LOCH, R. E. N. *Análise e melhoria da qualidade altimétrica dos dados da Shuttle Radar Topography Mission, SRTM-3*. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 60, n. 02. 2008.

TAKAKU, J.; TADONO, T.; TSUTSUI, K.; ICHIKAWA, M. *Validations of “AW3D” global dsm generated from ALOS PRISM*. **Remote Sensing and Spatial Information Sciences** , v. III, n. July, p. 25–31. doi: 10.5194/isprsannals-III-4-25-2016. 2016.

TAYLOR, P.; SATGÉ, F.; BONNET, M. P. *International Journal of Remote Accuracy assessment of SRTM v4 and ASTER GDEM v2 over the Altiplano watershed using ICESat / GLAS data*. Doi: 10.1080/01431161.2014.999166. 2015.

TOUTIN, T.; CHENG, P. *Comparision of Automated Digital Elevation Model Extraction Results Using Along-Track ASTER and Across-Track SPOT Stereo Images*. **SPIE Journal, Optical Engineering**, 41 (9), p. 2102-2106. 2002.

TOUTIN, T. *Geometric processing of Remote Sensing images: models, algorithms and methods*. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n 10, p. 1893-1924. 2004.

TRIOLA, M. F. *Introdução à estatística*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

TUKEY, J. W. *Exploratory data analysis*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1977.

URBAN, T. J.; SCHUTZ, E. B.; NEUENSCHWANDER, A. L. A Survey of ICESat *Coastal Altimetry Applications: Continental Coast, Open Ocean Island, and Inland River*. **Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences**, Taipei, v. 19, n. 1-2, p. 1-19, Abr. 2008.

VALERIANO, MARCIO de MORISSON. **Topodata: guia de utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos: INPE, 2008. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/topodata/contato.php> acesso em setembro de /2017>. Acesso em: ago. 2017.

VALERIANO, M. D. M.; ROSSETTI, D. D. F. *Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data*. *Applied Geography*. v. 32, n. 2. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.apgeog.2011.05.004. 2012.

VOSSelman, G. *Analysis of Planimetric Accuracy of Airborne Laser Scanning Surveys*. *In International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXVII: 99–104. 2008.

WARING, R. H.; WAY, J.; HUNT, Jr., E. R.; MORRISSEY, L.; RANSON, K. J.; WEISHAMPEL, J. F.; OREM, R.; FRANKLIN, S. E. Imaging radar for ecosystems studies. *BioScience*. n. 45, p. 715-723. 1995.

WOLF, P. R.; GHILANI, C. D. *Adjustment computations: Statistics and least squares in surveying and GIS*. New York: Wiley Series in Surveying and Boudary Control, 1997.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. *Geoestatística, conceitos e aplicações*. Editora: Oficina de textos, Edição digital Inc. São Paulo. p. 1-215. 2015.

ZWALLY, H. J.; SCHUTZ, B.; ABDALATI, W.; ABSHIRE, J.; BENTLEY, C.; BRENNER, A.; BUFTON, J.; DEZIO, J.; HANCOCK, D.; HARDING, D.; HERRING, T.; MINSTER, B.; QUINN, K.; PALM, S.; SPINHIRNE, J.; THOMAS, R. *ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land*. *Journal of Geodynamics*, v. 34.3, n. 3-4, p. 405-445, Amsterdam. 2002.

## APÊNDICE A

Código Pontos	E_Referência	N_Referência	E_SRTM	N_SRTM
PT01	718131	7533936	718129	7533938
PT02	708279	7537907	708280	7537905
PT03	715177	7524338	715114	7524337
PT04	707019	7527753	707022	7527755
PT05	718357	7530726	718352	7530728
PT06	718390	7536063	718390	7536065
PT07	718910	7524814	718911	7524815
PT08	719329	7530295	719330	7530299
PT09	705903	7530859	705908	7530850
PT10	709362	7535279	709366	7535280
PT11	713826	7535809	713825	7535810
PT12	706135	7536284	706140	7536285
PT13	714710	7538185	714715	7538180
PT14	715871	7534583	715874	7534586
PT15	712666	7531102	712667	7531105
PT16	709936	7531455	709930	7531453
PT17	714500	7528140	714502	7528143
PT18	711484	7532549	711485	7532551
PT19	709097	7525289	709099	7525293
PT20	711769	7526532	711774	7526530

## APÊNDICE B

Valores em metros		SRTM avaliados com pontos PPP			SRTM avaliado com pontos ICESat		
Região	Folha	EQM	ZE 90	PEC	EQM	ZE 90	PEC
Norte	MI-010	3,89	6,41	25C	2,26	3,63	25A
Norte	MI-012	14,86	22,88	100B	3,25	4,98	25A
Norte	MI-017	11,44	19,93	100A	3,07	5,08	25B
Norte	MI-022	25,6	35,25	250A	5,34	8,88	50A
Norte	MI-024	sem pontos	-	-	3,13	5,4	25B
Norte	MI-030	3,5	4,68	25B	3,35	5,56	25B
Norte	MI-038	sem pontos	-	-	2,66	4,17	25A
Norte	MI-044	16,02	23,65	100C	2,98	4,94	25A
Norte	MI-050	17,04	28,23	100C	3,62	6,22	25C
Norte	MI-051	9,99	16,99	100A	3,17	5,12	25B
Norte	MI-056	7,72	11	50B	4,29	7,48	25C
Norte	MI-059	11,07	18,82	100A	2,25	3,51	25A
Norte	MI-080	13,43	23,27	100B	3,57	5,8	25B
Norte	MI-085	6,69	11,73	50B	3,88	6,22	25C
Norte	MI-094	10,59	17,82	100A	4,01	7,25	25C
Norte	MI-102	14,39	22,58	100B	3,7	6,41	25C
Norte	MI-115	9,49	16,16	100A	4,94	7,77	50A
Norte	MI-122	18,72	27,63	100C	4,85	8,27	50A
Norte	MI-136	sem pontos	-	-	4,27	7,7	50A
Norte	MI-139	8,92	14,62	50C	5,06	7,99	50A
Norte	MI-142	14,1	23,87	100B	3,97	6,87	25C
Norte	MI-157	sem pontos	-	-	4,82	9,54	50A
Norte	MI-172	7,34	12,56	50C	4,58	7,26	25C
Norte	MI-185	sem pontos	-	-	4,44	7,7	50A
Norte	MI-192	16,29	22,84	100C	3,75	6,48	25C
Norte	MI-199	5,19	8,56	50A	3,7	5,86	25B
Norte	MI-219	14	21,55	100B	4,5	6,51	25C
Norte	MI-227	6,15	9,79	50A	3,6	5,36	25B
Norte	MI-241	16,63	23,58	100C	3,63	6,77	25C
Norte	MI-267	14,65	22,09	100B	3,92	4,08	25B
Norte	MI-269	14,74	22,97	100B	3,54	5,8	25B
Norte	MI-277	12,29	18,87	100A	4,69	8,88	50A
Norte	MI-290	22,41	36,16	250A	4,3	7,7	50A
Norte	MI-315	8,39	15,81	100A	3,66	5,83	25B
Norte	MI-336	9,01	14,8	50C	3,51	5,72	25B
Nordeste	MI-128	3,82	6,03	25C	2,76	4,47	25C
Nordeste	MI-129	3,83	6,06	25C	3,63	3,19	25B
Nordeste	MI-150	4,62	7,39	25C	3,1	5,12	25B
Nordeste	MI-178	4,27	6,66	25C	4,17	6,17	25C
Nordeste	MI-206	4,3	7,08	25C	4,29	6,66	25C
Nordeste	MI-227	6,15	9,79	50A	3,6	5,36	25B
Nordeste	MI-234	3,69	6,28	25C	3,01	4,96	25A
Nordeste	MI-255	10,92	8,54	100A	2,4	3,8	25A
Nordeste	MI-261	4,29	6,57	25C	3,4	5,41	25B
Nordeste	MI-307	10,73	9,32	100A	4,47	7,14	25C
Nordeste	MI-311	3,29	4,4	25A	2,04	3,25	25A
Nordeste	MI-329	3,12	5,52	25B	1,87	3,04	25A
Nordeste	MI-331	2,46	4,59	25A	2,14	3,73	25A
Nordeste	MI-347	5,65	8,48	50A	4,5	6,7	25C
Nordeste	MI-379	13,5	8,82	100B	3,87	5,61	25B
Nordeste	MI-415	3,94	6,87	25C	3,4	5,74	25B

Nordeste	MI-429	5,83	9,76	50A	2,88	4,72	25A
Centro-Oeste	MI-274	10,89	18,05	100A	3,77	7,11	25C
Centro-Oeste	MI-297	12,5	20,57	100B	3,86	6,84	25C
Centro-Oeste	MI-304	7,27	12,61	50C	4,06	6,26	25C
Centro-Oeste	MI-324	4,28	6,4	25C	2,81	4,39	25A
Centro-Oeste	MI-344	4,52	7,63	50A	2,37	3,76	25A
Centro-Oeste	MI-358	8,37	13,86	50C	3,13	4,82	25A
Centro-Oeste	MI-372	8,01	13,73	50C	3,97	6,01	25C
Centro-Oeste	MI-386	5,18	8,65	50A	3,2	5,1	25B
Centro-Oeste	MI-393	3,28	5,53	25B	2,93	4,61	25A
Centro-Oeste	MI-394	12,54	10,62	100A	2,79	4,31	25A
Centro-Oeste	MI-403	6,43	9,94	50A	5	7,04	25C
Centro-Oeste	MI-408	4,38	6,91	25C	3,88	5,79	25B
Centro-Oeste	MI-422	5,96	8,7	50A	5,13	6,97	50A
Centro-Oeste	MI-444	5,09	8,74	50A	2,94	4,69	25A
Centro-Oeste	MI-457	4,95	9	50A	2,66	4,33	25A
Centro-Oeste	MI-471	3,79	6,85	25C	1,95	3,08	25A
Sudeste	MI-436	7,03	9,49	50B	4,05	6,06	25C
Sudeste	MI-450	5,14	8,73	50A	3,39	5,29	25B
Sudeste	MI-464	7	11	50B	3,61	6,24	25C
Sudeste	MI-478	6,84	10,48	50B	3,46	5,65	25B
Sudeste	MI-485	3,7	5,84	25B	2,89	4,47	25A
Sudeste	MI-491	14,28	10,39	100B	3,28	5,3	25B
Sudeste	MI-499	6,31	9,42	50A	4,58	7,1	25C
Sul	MI-496	5,91	7,43	50A	3,01	4,67	25A
Sul	MI-512	6,38	10,77	50B	2,91	4,66	25A
Sul	MI-518	6,81	11,56	50B	3,29	5,47	25B
Sul	MI-526	11,93	15,25	100A	5,42	9,85	50A
Sul	MI-533	5,41	9,15	50A	2,67	4,28	25A
Sul	MI-539	4,06	7,07	25C	2,68	4,29	25A
Sul	MI-545	3,42	5,91	25B	2,45	3,9	25A